



Escola de Camins

Escola Tècnica Superior d'Enginyeria de Camins, Canals i Ports
UPC BARCELONATECH

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE
CATALUNYA

TRABAJO FINAL DE GRADO

Estimación de la curva
tiempo-flujo BPR en el distrito
Sarrià - Sant Gervasi de
Barcelona

Arias, Daria.

dirigido por
Campos Cacheda, Magín

15 de junio de 2018

Abstract

The urban mobility is currently one of the main issues of the developed cities. To take action, some tools are needed to provide easier and simpler ways to make desitions. This project develops an investigation on how to obtain an additional tool for the urban traffic case studies. The aim of this project is to obtain a tool to check the approximate car volume for a given speed. One of the expressions that connects the travel time and mean speed is the BPR formula, which has been developed by the Bureau of Public Roads in the 60's. Some streets in Barcelona had been analyzed in order to estimate the BPR curve with real data. The speed data had been obtained from TomTom, which provides the mean speed of a street in real time. The results of the estimation show that more data is needed to perform a better estimation of the BPR curve.

Key words: urban mobility, BPR curve, mongodb, travel time, capacity.

Abstract

La movilidad urbana es uno de los problemas que presentan las grandes ciudades. Para actuar es necesario obtener unos instrumentos que faciliten la toma de decisiones. Este proyecto desarrolla un estudio para obtener una herramienta adicional para el estudio del tráfico. Con ello se espera obtener un instrumento que permita el aforo aproximado de vías urbanas conociendo la velocidad de circulación de estas. Una de las expresiones que relaciona el tiempo de viaje con el número de vehículos que circulan en la vía es la curva BPR, presentada por el *Bureau of Public Roads* en los años 1960. Se han tomado mediciones de aforo en algunos tramos de las calles de Barcelona y se ha procedido a la estimación de la curva BPR a partir de los datos obtenidos. Los datos de velocidad se han decidido obtener de un servicio que ofrece TomTom en tiempo real. Los resultados del estudio muestran la necesidad de obtener más datos de aforo para una estimación más óptima de la curva BPR.

Palabras clave: movilidad urbana, curva BPR, mongodb, tiempo de viaje, aforo.

Índice

1. Introducción	1
2. Variables fundamentales del tráfico	2
2.1. Intensidad	2
2.1.1. Intensidad media diaria	4
2.1.2. Factor de hora punta	6
2.1.3. Composición del tráfico	6
2.2. Velocidad	7
2.3. Densidad	7
3. Circulación y relaciones entre las variables	10
3.1. Relación entre las variables fundamentales	10
3.1.1. Relación entre la densidad y velocidad	10
3.1.2. Relación entre la densidad e intensidad	11
3.1.3. Relación entre la intensidad y velocidad	13
4. Marco del proyecto	15
4.1. Fórmula BPR y sus limitaciones	16
4.2. Clasificación vías	19
4.2.1. Ronda General Mitre	21
4.2.2. Calle Mandri	24
4.2.3. Calle Ganduxer	25
5. Procedimiento	27
5.1. Toma de datos	27
5.1.1. Mediciones de intensidades	27
5.1.2. Datos de velocidades	30
5.1.3. Petición y almacenamiento de los datos de velocidades	32
5.2. Tratamiento de datos	36
5.2.1. Datos reales: mediciones tomadas	36
5.2.2. Curva teórica y sus parámetros	39

ÍNDICE

5.2.3. Cálculo de la capacidad	45
5.2.4. Obtención de la curva BPR	52
6. Resultados	53
6.1. Cálculo del error	53
6.2. Tramo Mandri ASC	55
6.3. Tramo Mandri DESC	59
6.4. Tramo Mitre 121 ASC	63
6.5. Tramo Mitre 121 DESC	66
6.6. Tramo Mitre 90 ASC	69
6.7. Tramo Mitre 90 DESC	72
6.8. Tramo Mitre 70 ASC	75
6.9. Tramo Mitre 70 DESC	78
6.10. Tramo Ganduxer ASC	82
6.11. Resumen de resultados	85
7. Conclusiones y futuros pasos	86
Apéndice A. Medidas tomadas manualmente <i>in situ</i>	97
Apéndice B. Datos horarios obtenidos y respuestas de TomTom	152

Capítulo 1

Introducción

Barcelona es la segunda ciudad más poblada de España, y cuenta con más de 1,6 millones de habitantes [2]¹ en sus 100 km^2 de superficie. En su conjunto el área metropolitana tiene casi 5,5 millones de habitantes. Es una ciudad de referencia cultural tecnológica y turística que crece año tras año. Durante los últimos años la población de Barcelona ha ido en aumento y en consecuencia el nivel de motorización de la población. La movilidad urbana cobra cada vez más importancia en ciudades modernas.

Una de las consecuencias del crecimiento de la ciudad es la congestión. La congestión es un fenómeno que se experimenta cuando el nivel de servicio de una vía disminuye porque la demanda excede la oferta y con ello aumenta el tiempo de viaje.

Existen dos tipos de congestión y ambas dependen de las características del tráfico. Una de ellas es llamada *recurrente* y es aquel tipo de congestión que se puede predecir. Es decir, es una situación que ocurre con frecuencia y por tanto se puede prever. Un ejemplo de ello es el aumento de tráfico durante las horas punta. El segundo tipo de congestión no es predecible y se llama *no recurrente*. Este fenómeno ocurre de una forma más aleatoria y depende de muchos más factores [1, pág. 19]. Un ejemplo de este tipo de congestión podría ser la demora ocasionada por un obstáculo en la vía.

Una de las vías de actuación para optimizar la movilidad urbana es estudiar el tráfico de las ciudades para así obtener herramientas que puedan ser utilizadas en beneficio de la calidad de movilidad y vida de los habitantes. Con dichos instrumentos se puede facilitar el proceso de toma de decisiones sobre la movilidad urbana. Este proyecto estudia el desarrollo de una posible nueva herramienta.

¹Según las estadísticas del año 2017.

Capítulo 2

Variables fundamentales del tráfico

La ingeniería del tráfico es una rama de la ingeniería civil que se centra en el estudio de diferentes fases de las vías de circulación, las cuales son el planeamiento, diseño y explotación. La finalidad de estos estudios es garantizar una circulación tanto de vehículos como de peatones segura y eficaz, asegurando un cierto nivel de servicio.

Para lograr el estudio de la circulación se ha definido cierto conjunto de variables, de las cuales existen tres *variables fundamentales del tráfico*. Éstas son dependientes entre sí y son consideradas las variables básicas ya que conociendo las tres, es posible determinar la circulación de una vía. Además existen otras variables como son la demora, el tiempo de recorrido o separación entre vehículos, las cuales son consideradas variables complementarias. La relación de las tres variables fundamentales se indica a continuación, donde I hace referencia a la *intensidad* expresada en (*vehculos/tiempo*), V a la *velocidad* (*longitud/tiempo*) y por último la D a la *densidad* expresada en (*vehculos/longitud*).

$$I = VD \quad (2.1)$$

A continuación se explican brevemente cada una de estas variables, para poder completar el capítulo indicando las relaciones que existen entre ellas.

2.1. Intensidad

La *intensidad* está definida como el número de vehículos que pasan por una sección fija de una vía por unidad de tiempo. Por un lado su valor depende de la sección definida y es por ello que se puede hablar de diferentes

tipos de intensidad, como se indica en la figura 2.1. Se puede observar los tipos de intensidades que pueden utilizarse, como la intensidad de calzada, intensidad de un sentido de circulación, intensidad de un carril o intensidad total. Por otro lado además se pueden distinguir intensidades según la unidad de tiempo escogida para su definición. Las unidades más utilizadas son la hora y el día, por ello se habla de intensidad horaria o diaria respectivamente, según la unidad utilizada. La unidad estandarizada son los *veh/h*.

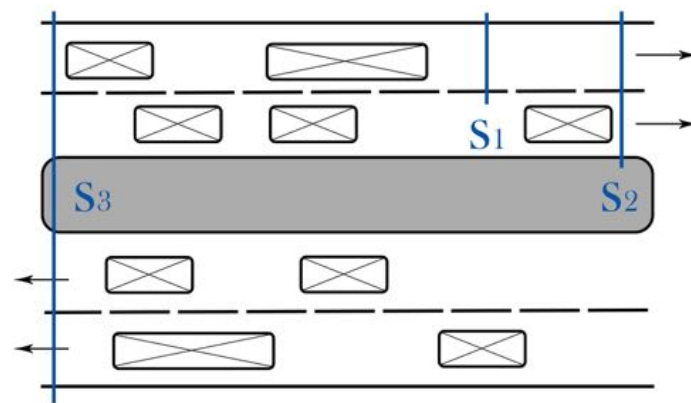


Figura 2.1: Tipos de intensidad: carril (sección S1), sentido (sección S2) y calzada (sección S3). Fuente: elaboración propia.

La intensidad es una de las variables más importantes en el estudio de la circulación ya que ofrece una descripción intuitiva del estado del tráfico. Se ha observado que la intensidad de una vía varía cíclicamente a lo largo del tiempo. Esta tendencia se puede dividir en dos componentes, en una primera componente predecible a largo plazo y en una superposición de variaciones aleatorias. Estas tendencias pueden ser agrupadas según el periodo de tiempo a estudiar. Por ejemplo si se toma como referencia una serie de años se observará en general una tendencia creciente en las intensidades, especialmente en núcleos grandes que además presenten crecimiento económico. En zonas de decrecimiento se presentará una tendencia contraria en las intensidades.

De igual modo se pueden analizar las variaciones cíclicas en el transcurso de un año, en el cual se utilizan las intensidades mensuales. Estas intensidades muestran un crecimiento en los periodos de verano, y se presentan unas intensidades menores durante el invierno. Cabe destacar que en los núcleos que no son turísticos el decrecimiento se presenta en verano, especialmente

en agosto.

En las observaciones en el periodo semanal se diferencia entre los días laborables y los festivos. Por último en el análisis diario, utilizando intensidades horarias se observa una dependencia del tipo de vía y de su localización. Tomando como ejemplo el caso de estudio de este trabajo, tratándose de una vías urbanas en un núcleo grande y desarrollado y tomando días laborables se observa un crecimiento de la intensidad durante la mañana entre las siete y las nueve de la mañana, una intensidad con leves variaciones durante el día y con un segundo pico entre las seis y las ocho de la tarde, para culminar en una disminución de intensidades a partir de las nueve de la noche.

Es posible analizar también las variaciones de intensidad a corto plazo, durante menos de una hora. No obstante cuánto más reducido el tiempo de análisis más aleatorias se vuelven las variaciones, por ello el intervalo más ajustado en que se pueden comparar las intensidades es de una hora.

En el estudio del tráfico la intensidad es un dato clave para cualquier estudio que se desee llevar a cabo, sea de planeamiento, de proyecto o de explotación de redes.

2.1.1. Intensidad media diaria

La intensidad media diaria se define como la relación entre el número total de vehículos que han pasado por una sección dada durante un año dividida por los días del año.

Esta medida de la intensidad es usada especialmente en la fase de planificación de una vía, estudios estadísticos y tendencias de la variación del tráfico. Es además una buena herramienta para clasificar las vías de circulación, como se puede observar en el siguiente mapa 2.2 de Barcelona que indica las diferentes arterias para entrar o salir de la ciudad. A consecuencia del crecimiento del nivel de motorización de la población, las vías con tráfico importante pueden verse afectadas por las fluctuaciones aleatorias y por ello en este tipo de vías no basta sólo tener en cuenta las intensidades horarias. Para poder tener en cuenta las variaciones aleatorias del tráfico se establece un factor que representa las variaciones del tráfico a corto plazo en una vía.

CAPÍTULO 2. VARIABLES FUNDAMENTALES DEL TRÁFICO

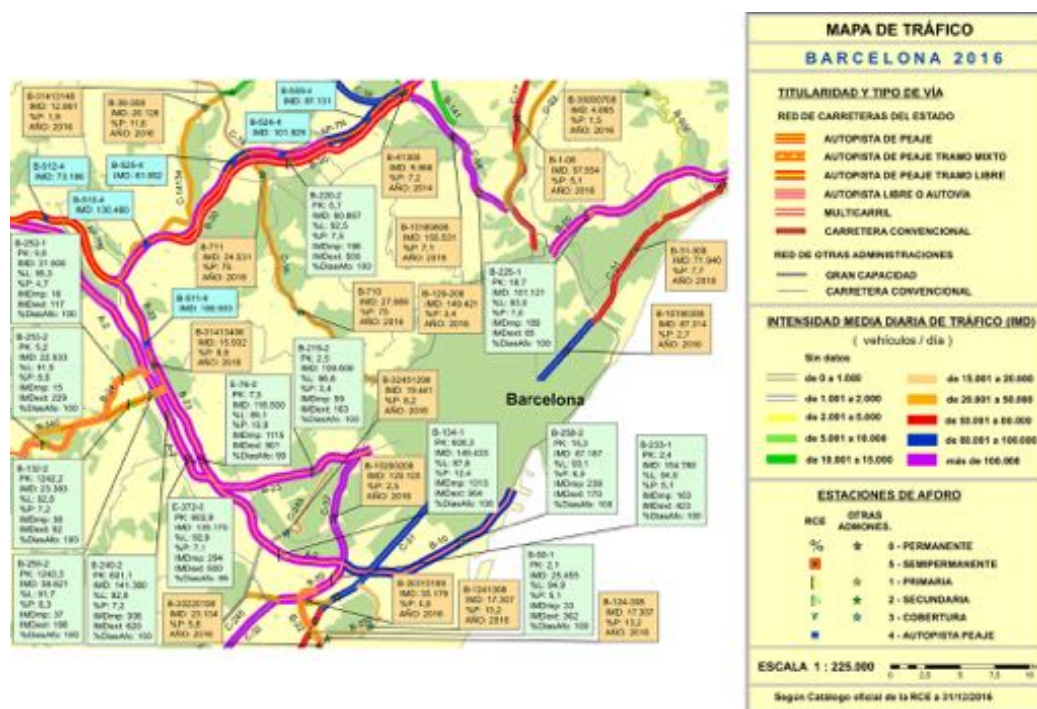


Figura 2.2: Mapa de Barcelona con las IMD indicadas para las vías principales de acceso. Fuente: Ministerio de Fomento. Mapa provincial año 2016.

2.1.2. Factor de hora punta

El *factor de hora punta* muestra la relación entre la intensidad horaria de una vía y la intensidad máxima, tomando periodos de tiempo dentro de esa hora. Así se pueden definir tanto periodos de quince minutos como de cinco. Dicho factor representa la homogeneidad del tráfico de la vía.

$$FHP = \frac{I_{60}}{4I_{15}} \quad (2.2)$$

$$FHP = \frac{I_{60}}{12I_5} \quad (2.3)$$

Siento I_{60} , I_{15} , y I_5 las intensidades horaria, máxima en periodo de quince minutos y máxima en periodo de cinco. Por lo tanto el factor de hora punta tiene un valor máximo de 1. Cuánto más se acerque su valor a la unidad, representa que más homogéneo es el estado del tráfico, es decir, que está bien repartido durante esa hora de estudio. Por el contrario si su valor se aleja de la unidad, se traduce en un tráfico heterogéneo.

2.1.3. Composición del tráfico

Además de estudiar la cantidad de vehículos que circulan por una vía a menudo es interesante conocer también el tipo de vehículo que circula por ésta. La composición variará dependiendo tanto del tipo de vía como de la zona de estudio y de la época del año, día de la semana, etc. Una posible clasificación podría ser la siguiente:

- Motocicletas
- Vehículos ligeros
- Vehículos pesados

Dado el grado de motorización de la ciudad objetivo de este estudio y las vías seleccionadas para este, es interesante estudiar además los vehículos que componen la circulación de las vías estudiadas. En este proyecto se clasifican los vehículos como se indica a continuación:

- Tipo I Bicicletas
- Tipo II Motocicletas
- Tipo II Vehículos ligeros: coches y camionetas de cuatro ruedas
- Tipo III Vehículos pesados: autobuses y camiones

2.2. Velocidad

Si se estudia un sólo vehículo es trivial observar que su *velocidad* oscila, incluso si el conductor desea mantener una velocidad constante. Luego en una vía en que se desea tener en cuenta los vehículos que conforman el tráfico de la vía, lo adecuado es estudiar la velocidad media de éstos en lugar de la instantánea. La unidad utilizada para la velocidad son los km/h . Para estudiar la evolución de las velocidades de los vehículos de la vía se han definido las siguientes velocidades medias.

- Velocidad media espacial: se define como la velocidad media de todos los vehículos que se encuentran en un instante determinado en un tramo de la carretera concreto.
- Velocidad media temporal: es la velocidad media de los vehículos que pasan por una sección fija durante un periodo de tiempo determinado.
- Velocidad media de recorrido: se define como la velocidad media de todos los vehículos que recorren un mismo tramo de una vía.

La velocidad es una variable que depende de diversos factores como pueden ser el estado de la carretera, refiriéndose al trazado, estado del pavimento, obstáculos en el camino, condiciones climatológicas y hora del día.

2.3. Densidad

Se define densidad del tráfico a la cantidad de vehículos que se encuentran en unidad de longitud en un tramo de vía, luego la unidad utilizada son los veh/km . Del mismo modo que se ha mencionado con los estudios de la intensidad, la densidad puede referirse a la de una calzada, un sentido o incluso un carril.

Esta variable tiene un valor máximo, el cual ocurre cuando los vehículos se encuentran en fila sin espacio entre unos de los otros, este máximo es alcanzado cuando los vehículos están parados ya que esta situación en circulación no podría llegar a mantenerse. Esta variable es la utilizada para definir el *nivel de servicio* de una vía. Estos niveles se dividen en seis, cada uno delimitado por cierto intervalo de densidades. Estos valores difieren entre vías¹. Es intuitivo observar que el nivel de servicio depende de algunos factores

¹Según el Manual de Capacidad 2010 del Transportation Research Board de los Estados Unidos de América (HCM 2010) los niveles de servicio se definen de forma diferente para

como los siguientes:

- Libertad de maniobra: poder mantener la velocidad deseada
- Comodidad en la circulación
- Seguridad de conducción, obstáculos en la vía y señalización correcta
- Tiempo de recorrido
- Interrupción de circulación: especialmente notorio en zonas con circulación discontinua. La frecuencia de cambios en el tráfico, por ejemplo regulado por ciclos semafóricos, cobra importancia.
- Calidad de la vía y sus materiales

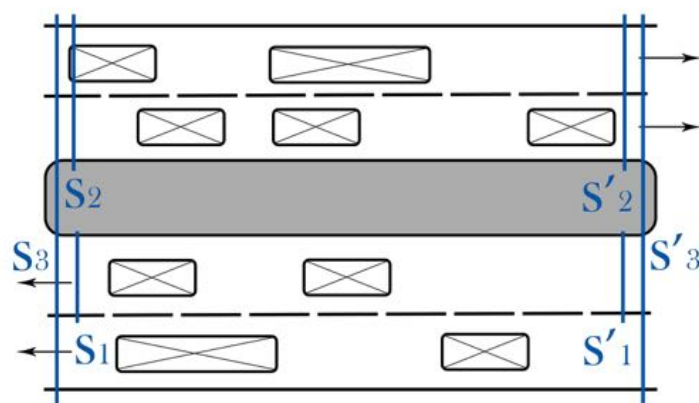


Figura 2.3: Tipos de densidad: carril (sección S1-S'1), sentido (sección S2-S'2) y calzada (sección S3-S'3). Fuente: elaboración propia.

En el estudio del tráfico existen otras variables a parte de las fundamentales ya mencionadas. Una de ellas es la *separación entre vehículos*, expresada en *metros*. Su importancia reside no solamente en que es un factor que influye en la accidentalidad de la vía sino también en la calidad de circulación,

diferentes vías. Por lo tanto existen varias tablas divididas para autopistas y autopistas, tramos de trenzado, convergencias y divergencias, y vías clasificadas según su funcionalidad. Los niveles de servicio se denominan con las letras “A”, “B”, “C”, “D”, “E” y “F”, siendo “A” el mejor nivel de servicio y “F” el más desfavorable. A parte de la densidad se pueden utilizar otros factores para la clasificación de niveles de servicio como la velocidad media de recorrido o el porcentaje de tiempo en que se circula detrás de un vehículo lento [5] .

término explicado en el capítulo 3. Esta variable está relacionada con la densidad.

El *intervalo*, expresado en *segundos* entre vehículos es el tiempo transcurrido entre el paso de los vehículos en una misma sección de la vía estudiada. El intervalo está relacionado con la intensidad.

La *demora* es un término que describe el tiempo que el vehículo se encuentra parado o bien por la regulación del tráfico en sí o bien por la congestión de la vía. Es una medida interesante de estudiar especialmente en las intersecciones y para el registro y diseño de los ciclos semafóricos.

Capítulo 3

Circulación y relaciones entre las variables

La circulación de una vía puede ser de dos tipos, continua o discontinua. Se define la *circulación continua* como aquella que carece de elementos externos que regulen el tráfico, y por lo tanto no requiere que los vehículos se detengan. Es el caso de vías que no tienen señales de Stop, Ceda o regulación semafórica.

Por otro lado la circulación discontinua es aquella que contiene elementos que regulan el tráfico y por lo tanto provocan interrupciones de forma periódica en el flujo de vehículos.

3.1. Relación entre las variables fundamentales

Tal y como se ha indicado anteriormente en el capítulo 2, hay tres variables fundamentales del tráfico que guardan relación entre sí. Conociendo dos de estas variables es posible encontrar la tercera. Por lo general, dada la dificultad para realizar su medición la variable que se relaciona con las demás es la densidad. Nótese que para poder aplicar correctamente esta definición la velocidad debe ser la velocidad media espacial.

$$I = VD \tag{3.1}$$

3.1.1. Relación entre la densidad y velocidad

Si se toman unas sencillas consideraciones se puede obtener rápidamente la curva que relaciona la densidad del tráfico con la velocidad. Primero, si se considera una densidad muy reducida, los vehículos que conforman el tráfico

se encontrarían con cierta separación entre ellos, con lo cual los conductores podrían alcanzar una *velocidad libre*, siendo esta la máxima permitida según las características de la propia vía y del vehículo en cuestión. Seguidamente si la densidad aumenta, los vehículos tendrán menor separación entre ellos y los conductores se verán obligados a reducir su velocidad por encontrarse vehículos frente a ellos. Luego el aumento de la densidad, implica una disminución de la velocidad media. Por último, considerando que se alcanza la *densidad máxima*, aquella en la cual toda la vía está ocupada por vehículos sin separación entre ellos, no habría circulación ninguna y con ello la velocidad sería nula. Finalmente se obtiene una curva que relaciona la densidad y la velocidad, cuya forma se asemeja a la de la figura 3.1.

Dicha curva varía según la vía estudiada. Cabe destacar que la influencia

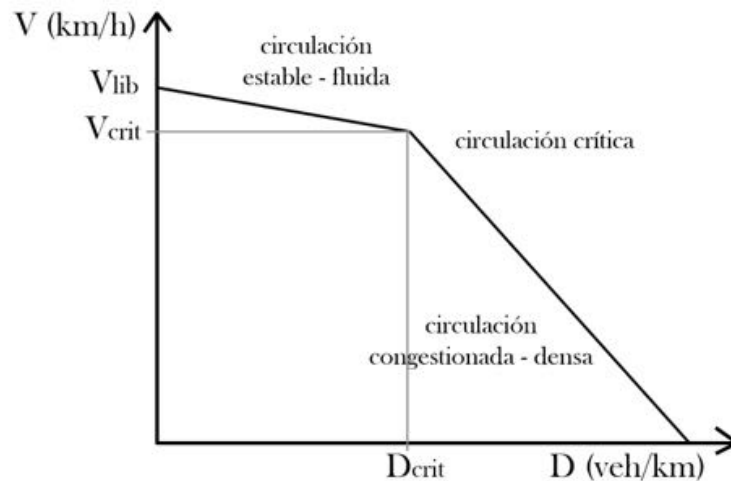


Figura 3.1: Representación esquemática de la relación velocidad - densidad. Fuente: elaboración propia.

de las características de la vía es mayor cuanto menor sea la densidad de ésta. Es decir, si se tiene una densidad baja, la velocidad de los vehículos dependerá del tipo de vía en lugar de los demás vehículos. Por el contrario, si se tiene una densidad alta, la velocidad de los vehículos dependerá de los que tienen delante.

3.1.2. Relación entre la densidad e intensidad

Del mismo modo que se ha procedido anteriormente para obtener la relación de densidad y velocidad se puede obtener esta nueva relación. Primero,

si se considera una densidad nula, el flujo también lo será. Seguidamente si se tiene la densidad máxima, se alcanzará velocidad nula como se ha visto anteriormente y con lo cual el flujo también lo será. Entre estos dos extremos de la función que tienen flujo nulo, se tiene un flujo positivo, el cual llega a su máximo, separando así el tráfico en un estado estable y otro congestionado, como se indica en la figura 3.2.

Nótese que el pico de la intensidad significa que hay un valor máximo del

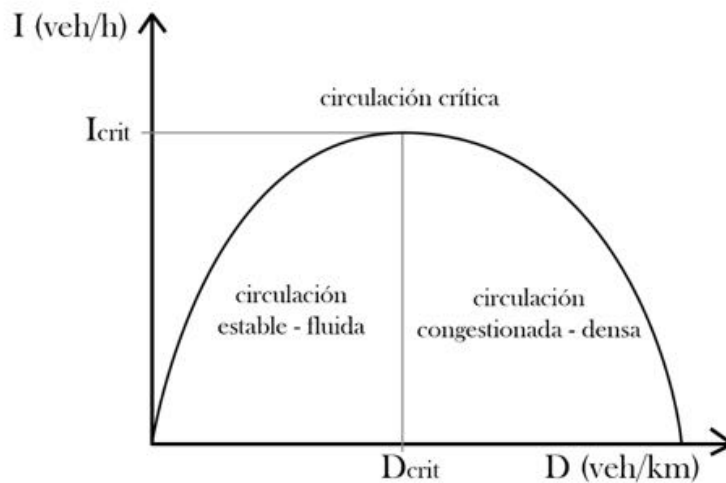


Figura 3.2: Representación esquemática de la relación intensidad - densidad. Fuente: elaboración propia.

flujo en una vía, para cierta densidad llamada *densidad crítica*. Este flujo máximo se denomina *capacidad de la vía* y tal como se ha comentado, separa la circulación estable de la inestable, es decir, la congestionada.

Es importante entender que la capacidad, al ser el valor máximo de vehículos que pueden atravesar una sección determinada de una vía por unidad de tiempo, depende de muchos factores y por ello existen diversas formas para determinar la capacidad de una vía en función de dichos factores. Seguidamente se presentan algunos de ellos.

Condiciones físicas: estas pueden ser el tipo de circulación en sí (si es circulación en un sentido o en ambos), la existencia de vehículos estacionados a lo largo de la vía, la pendiente de ésta y el ancho de sus carriles.

Condiciones ambientales: por un lado en condiciones climáticas favorables la capacidad será mayor, debido a la comodidad de conducción, en

condiciones adversas la capacidad mengua. Por otro lado la capacidad además depende de la zona en que se encuentra la vía, ya que en ciudades más pobladas y con mayor grado de motorización la capacidad es mayor que en otros núcleos más reducidos.

Características del tráfico: la existencia de vehículos pesados en la vía condiciona el valor de la capacidad de ésta. Así como también tienen importancia las maniobras que se permiten en un tramo de la vía como son los giros y el estacionamiento.

Regulación del tráfico: se tienen en cuenta aquellas medidas de control que obligan a tener una circulación discontinua. La existencia de ciclos semafóricos reguladores del tráfico así como la duración de éstos (duración de la fase verde), influye en la capacidad.

Este diagrama que representa la relación entre densidad e intensidad es el más importante de los tres que definen las relaciones de las variables fundamentales. Esto es debido a que dadas una densidad y una intensidad, la tercera variable se puede obtener como la pendiente de la recta que une el origen con el punto del diagrama en concreto. Además este diagrama presenta una forma simple e intuitiva de representar la relación entre las variables fundamentales. En consecuencia este diagrama es llamado el *diagrama fundamental* del tráfico.

3.1.3. Relación entre la intensidad y velocidad

La forma de la curva que relaciona la intensidad y la velocidad se puede deducir como se ha hecho en los casos anteriores. Primero se deduce que para una misma intensidad hay dos posibles velocidades, ya que si la intensidad es muy baja, puede deberse a que no hay muchos vehículos en la vía y por ello la velocidad media de los conductores es la velocidad libre. Así mismo si la intensidad es baja también puede deberse a que la circulación es inestable y con ello las velocidades medias bajas. De esta forma la curva se divide en parte superior e inferior, delimitando las circulaciones estable e inestable respectivamente, como se indica en la figura 3.3 .

Esta última relación es de gran importancia en el estudio del tráfico ya que ambas variables son sencillas de obtener, al contrario que la densidad. Adicionalmente la velocidad refleja la calidad de circulación y la intensidad la demanda de la vía y por ello se puede obtener una clasificación de los niveles de servicio de una vía y así estudiar los costes de recorrido. Esta es la relación en la que se centra el presente estudio.

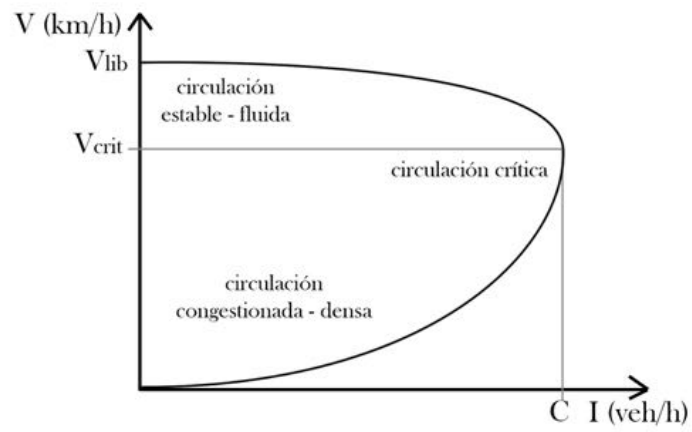


Figura 3.3: Representación esquemática de la relación intensidad - velocidad.
Fuente: elaboración propia.

Capítulo 4

Marco del proyecto

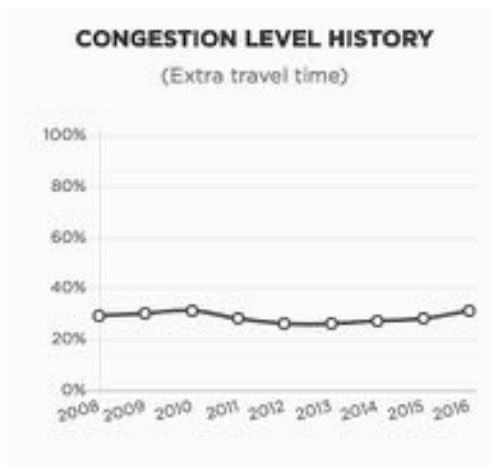
El presente estudio se ha realizado en la ciudad de Barcelona, España. Dicha ciudad tiene un elevado grado de motorización y un nivel de congestión que ha aumentado un 3 % respecto el año 2015 ¹. La progresión de la congestión de la ciudad en los últimos años se ve reflejada en siguiente figura. Se observa que dicho nivel de congestión tiene leves variaciones en los días laborables, y por ello el presente estudio excluye a priori los días festivos. Es una ciudad con gran afluencia turística y dada la intensa circulación dentro de la ciudad es interesante poder valorar la circulación de las calles de Barcelona.

La finalidad del presente estudio es obtener las relaciones de velocidad intensidad de ciertos tramos de vía urbana de la ciudad de Barcelona, con el objetivo de cuantificar el flujo en estos tramos conociendo la velocidad media de la circulación. Los resultados esperados tienen interesantes aplicaciones como pueden ser obtener una primera estimación del tráfico de una vía según la velocidad de ésta.

¹Nivel de congestión del año 2016 en Barcelona se ha situado en un 31 %, en comparación con el 28 % del año 2015. Nivel de congestión medido como el incremento medio del tiempo de recorrido en relación a la velocidad libre. Datos obtenidos por TomTom.



(a) Evolución horaria durante lunes y martes de la velocidad de circulación en Barcelona. Fuente: TomTom



(b) Evolución del nivel de congestión durante los últimos años en Barcelona. Fuente: TomTom



(c) Pico estimado como demora del tiempo de viaje durante la mañana en Barcelona. Fuente: TomTom

Estimaciones de varios indicadores de tráfico en Barcelona. Fuente: TomTom City

4.1. Fórmula BPR y sus limitaciones

Numerosos son los estudios que se han llevado a cabo en ingeniería del tráfico en los Estados Unidos de América. Los resultados obtenidos y sus aplicaciones se recogen en un manual. Frecuentemente este manual llamado *Highway Capacity Manual*[8] (a menudo llamado simplemente HCM 2000 por uno de los años de edición) se utiliza como referencia en el estudio del tráfico. Bien es cierto que las condiciones de circulación varían de un país a otro, este manual es una buena herramienta, por sus pautas y recomendaciones. En el estudio del tráfico la relación del tiempo de viaje y la intensidad de circulación se relacionan normalmente con la formulación BPR (*Bureau of Public Roads* de los Estados Unidos de América) mostrada a continuación:

$$T(I) = T_0 \left(1 + \alpha \left[\frac{I}{C} \right]^\beta \right) \quad (4.1)$$

$$T(I) = T_0 \left(1 + \alpha \left[\frac{I + \gamma(I')}{C} \right]^\beta \right) \quad (4.2)$$

Donde:

- T_0 indica el tiempo de viaje en condiciones de circulación libre
- I indica la intensidad determinada
- C indica la capacidad de la vía
- α y β son parámetros a calibrar
- γ parámetro que representa la influencia del sentido contrario al estudiado
- I' indica la intensidad de circulación en sentido opuesto

Los parámetros α y β son variables que dependen del tipo de vía estudiada y cuyos valores por defecto se establecen en 0,15 para el parámetro α y en 4,00 para β , según el HCM. Estos valores por supuesto no representan todas las tipologías de vías y por lo tanto deben ser calibrados. Dicha estimación se puede realizar a partir de modelos de tráfico o de datos reales. En este proyecto se han tratado datos reales para realizar la estimación de los parámetros en diferentes tramos de Barcelona. Nótese que en el presente estudio más adelante se explican los tramos estudiados. Únicamente hay un tramo que presente una circulación en ambos sentidos sin separación entre los carriles. No obstante se ha considerado el parámetro γ como 1.00 por simplificación y por tanto se interpreta como un tramo que consta de separación entre los dos sentidos de circulación.

A partir de la expresión anterior es posible relacionar el tiempo de viaje con la velocidad de circulación y en consecuencia relacionar la velocidad con la intensidad. De este modo, considerando separación entre sentidos en la vía se tiene que:

$$V(I) = \frac{V_0}{\left(1 + \alpha \left[\frac{I}{C} \right]^\beta \right)} \quad (4.3)$$

Donde:

- V_0 y V indican la velocidad en condiciones de circulación libre y la medida, respectivamente

La formulación BPR tiene algunas limitaciones. Una de las limitaciones que posee es la incerteza de sus propios parámetros, y es que su valor varía en función de varias condiciones de circulación. Unos de los factores de los cuales depende son las condiciones meteorológicas, geométricas y funcionales de la vía así como del comportamiento de los conductores y de la hora del día [4]. Por ello sería interesante presentar un rango de valores que pueden tomar los parámetros calibrados, en lugar de estimar un único valor.

Otra limitación que posee el modelo es que, por un lado ciertamente demuestra ser un modelo válido para tiempos de viaje en los cuales la intensidad se encuentra por debajo de la capacidad. Por otro lado el modelo genera una curva que representa una demanda del tráfico mayor a la capacidad. De hecho, según la propia definición de la capacidad una vía no puede permitir un flujo mayor que el de la capacidad². Por lo tanto teóricamente sobrepasada la capacidad el modelo deja de ser conceptualmente válido. En la siguiente figura se presenta la forma que toma la curva BPR junto con la curva derivada de ésta que expresa la velocidad.

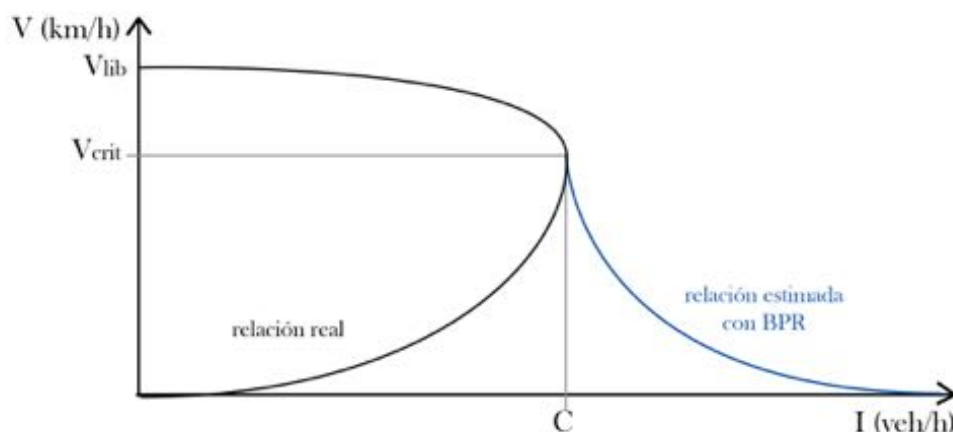


Figura 4.2: Formas que toma la curva teórica y sus limitaciones. Fuente: elaboración propia.

²En algunas vías se puede presentar un flujo mayor al permitido pero de forma puntual, en unos intervalos de tiempo pequeños. En consecuencia se obtendría un FHP pequeño, lo cual permitiría reflejar el carácter heterogéneo y no uniforme de la circulación.

Debido a estas limitaciones se han ido estudiando alternativas que presenten unas soluciones modificadas a la propuesta de la BPR en los años 1960 [6]. Las modificaciones, no obstante, no son objeto de este estudio y por ello se ha utilizado la formulación original.

4.2. Clasificación vías

Se han clasificado las vías a estudiar en función del número de carriles, la integración del tráfico y su sección. Para dicho estudio se ha decidido analizar vías de circulación intensa por tener éstas mayor importancia a nivel urbano. Por ello se han descartado las vías menores, como son las calles secundarias con menor tráfico en los alrededores. Se han estudiado cinco tramos cada uno con sus respectivos sentidos de circulación. Dichos tramos pertenecen a una misma zona, este hecho se debe a que en las intersecciones la demora no solamente se ve afectada por las características de la vía como pueden ser su sección, regulaciones de circulación y composición del tráfico sino también por las vías con las que se conecta la intersección [3]. Esta influencia es más notoria en vías de circulación intensa, como es el presente caso. En la figura 4.3 se muestra la localización de las vías estudiadas de Barcelona.

Se pueden utilizar diversas formas para clasificar vías. Las vías estudiadas en este proyecto son todas urbanas convencionales arteriales [5] con velocidades de circulación permitidas de hasta $50km/h$. Se han tenido en cuenta a priori los factores que se explican a continuación para la clasificación de vías porque se ha considerado interesante analizar si los resultados obtenidos se pueden aplicar a vías de condiciones similares³. Por ejemplo los criterios más habituales son los siguientes:

- Grado de integración del tráfico. Según este criterio se tienen en cuenta los modos de transporte que pueden circular por la vía.
- Actividad dominante del entorno de la calle.
- Anchura de la vía. Se ha tenido en cuenta el ancho de carril también.

Los tramos estudiados pertenecen al distrito Sarrià - Sant Gervasi y se encuentran en los barrios Sant Gervasi - Bonanova y Las Tres Torres. Este

³Para poder observar si los resultados se pueden aplicar a vías similares se tiene que poder definir qué es una vía similar a las estudiadas, por ello se presentan los criterios de clasificación⁴. Los resultados así como la posible aplicación a otras vías se presentan en el capítulo 6

distrito es el segundo más grande en extensión de Barcelona, que cuenta con $20km^2$ de los cuales prácticamente $4,6km^2$ son residenciales [2]. Con ello, la extensión de uso residencial de este distrito es mayor que en los otros nueve de la ciudad, es el que tiene menor densidad de los nueve distritos y mayor renta per cápita.

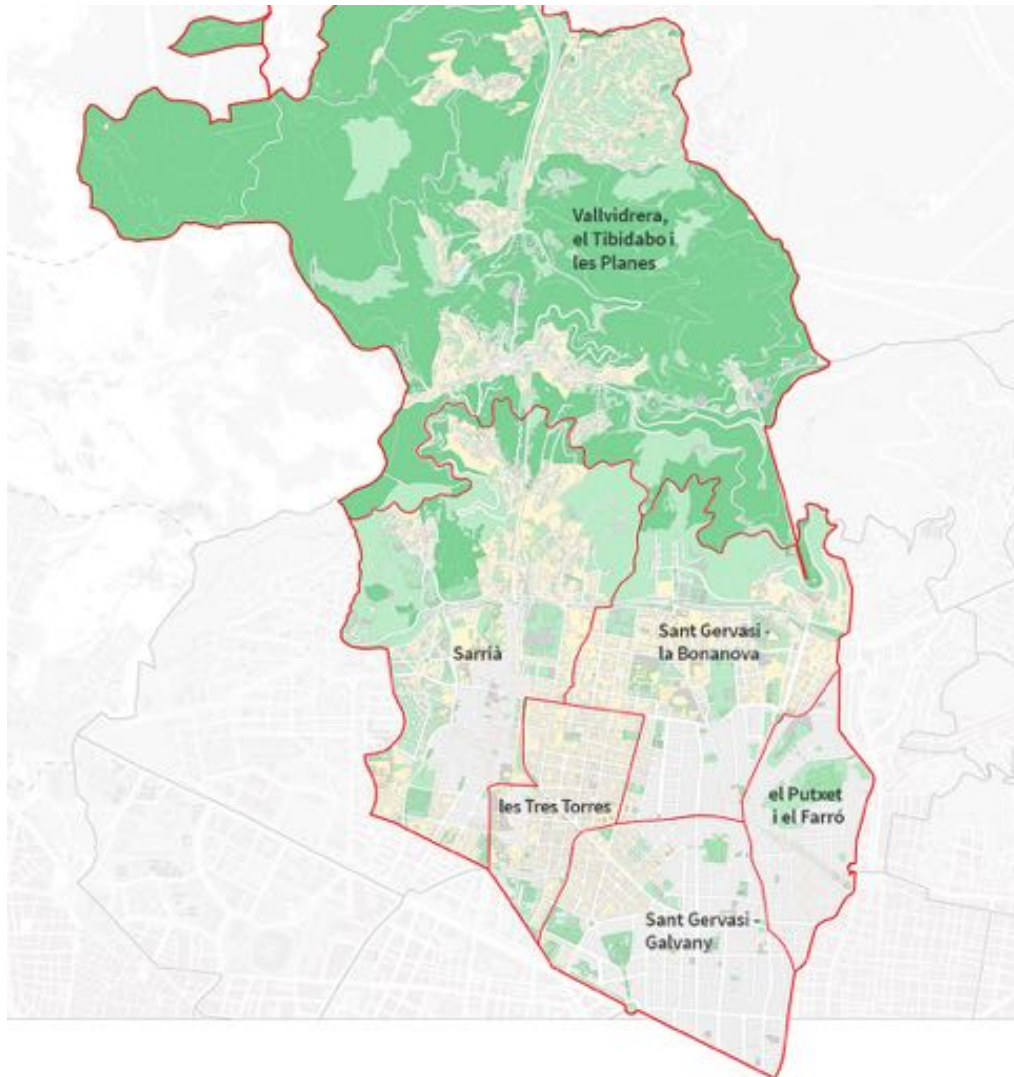


Figura 4.3: Localización del distrito Sarrià - Sant Gervasi. Fuente: Ajuntament de Barcelona.

A continuació se adjuntan fotografies de les dos interseccions principals que existeixen entre els trams escogits per al present estudi. Una de les

intersecciones es de la Calle Mandri con Ronda General Mitre. La segunda intersección, que contiene cinco de los nueve tramos estudiados es la de las Calles Ganduxer y Ronda General Mitre.



(a) Intersección de las calles Mandri y Ronda General Mitre



(b) Intersección de las calles Mandri y Ronda General Mitre



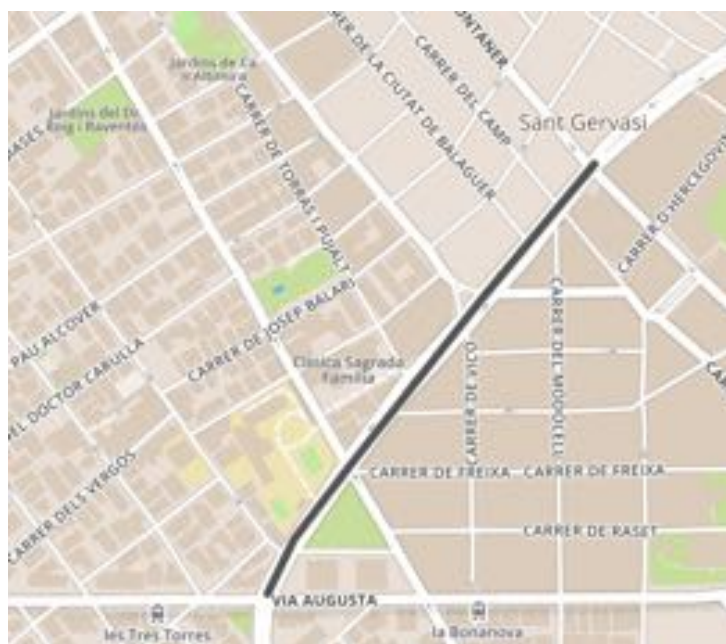
(c) Sección Mitre 90 ASC

Figura 4.4: Fotografías de las intersecciones de los tramos estudiados. Fuente: elaboración propia.

4.2.1. Ronda General Mitre

Una de las calles indicadas en la figura es General Mitre. Se trata de una vía de gran importancia en la ciudad, que se comunica con calles de menor

entidad y forma una conexión entre los diferentes distritos de la ciudad. Tiene un flujo vehicular y peatonal alto y consta de aceras de $4m$ de ancho y una calzada de $18m$ compuesta por 3 carriles por sentido. La circulación de los dos sentidos está dividida por una mediana de $2m$ de ancho.





(a) Sección Mitre 70 ASC



(b) Sección Mitre 70 DESC



(c) Sección Mitre 90 ASC



(d) Sección Mitre 90 DESC



(e) Sección Mitre 121 ASC



(f) Sección Mitre 121 DESC

Figura 4.6: Fotografías de las secciones de los tramos estudiados de La Ronda General Mitre. Fuente: elaboración propia.

4.2.2. Calle Mandri

La segunda calle estudiada es la Calle Mandri. Se trata de una calle con una circulación mucho menos intensa en comparación con Ronda General Mitre. Es una calle de doble sentido que tiene dos carriles por sentido. Una pequeña parte de la calle tiene ambos carriles disponibles para todo tipo de vehículo pero el tipo de sección que se ha tomado en consideración es el que representa la mayor parte de la calle. Dicha sección se observa en las fotografías adjuntas. Esta calle tiene carriles de menores de $3m$ y tiene anchas aceras peatonales de $4m$ de ancho.

En el sentido descendente de la calle se tienen dos carriles para todo tipo de vehículos y en el sentido ascendente uno de los carriles es de uso exclusivo de autobús. Esta calle recibe el paso de varias líneas de autobuses escolares ya que tiene varios en su proximidad. Se trata de una calle cuyos edificios son residenciales y tienen un comercio en la planta baja, y por ello en esta calle también hay muchos locales de restauración.



Figura 4.7: Mapa de la localización de la Calle Mandri. Fuente: elaboración propia.



(a) Sección Mandri ASC



(b) Sección Mandri DESC

Figura 4.8: Fotografías de las secciones de los tramos estudiados de la Calle Mandri. Fuente: elaboración propia.

4.2.3. Calle Ganduxer

La tercera calle estudiada en este proyecto es la Calle Ganduxer. Se trata de una calle que interesa con Ronda General Mitre. La sección de dicha calle consta de tres carriles en el tramo estudiado, siendo uno de ellos destinado a la circulación del autobús. Es una calle principalmente de uso residencial. Tiene carriles aproximadamente $3m$ y aceras peatonales estrechas. El tramo estudiado recibe el paso de dos líneas de autobús público.

Nótese que el tramo estudiado de esta calle tiene un carril bici. Dicho carril no se ha considerado durante las mediciones ya que implica tráfico segregado. Se ha considerado que la circulación de las bicicletas no influye en el tráfico rodado ya que hay una separación física entre ambos.



Capítulo 5

Procedimiento

El procedimiento a seguir para realizar el estudio se divide en tres fases principales: clasificación de vías, toma de datos y su tratamiento. La clasificación se ha incluido en el capítulo anterior ya que pertenece al entorno del proyecto y se ha explicado el dicho apartado.

5.1. Toma de datos

En esta sección se procede a explicar cómo se ha realizado la toma de datos necesaria para este estudio así como las consideraciones que se deben tomar. La presente sección se divide en la explicación relacionada con los datos de intensidad y velocidad.

5.1.1. Mediciones de intensidades

La actividad de aforar consiste en medir la cantidad de vehículos que pasan por una determinada sección durante cierto intervalo de tiempo. Dicho intervalo depende del objetivo del estudio a realizar. Los aforos se pueden realizarse de forma automatizada o manual. En este estudio se ha realizado de la segunda manera. En consecuencia aparecen varios factores que deben ser considerados para realizar el estudio de los datos obtenidos.

En el presente caso se han realizado mediciones manuales de aforo cada cinco minutos. Adicionalmente es posible clasificar los vehículos en diferentes tipologías para así clasificar el tráfico, tal y como se ha hecho en este caso. A causa del método escogido para las mediciones se debe tener en cuenta que el número de datos obtenidos es limitado, ya que realizar aforos manuales de más de dos horas se vuelve más complejo.

Se considera el error de medición cometido a continuación. Se dividen las principales causas de errores en las mediciones según operador, instrumentos de medida o errores aleatorios. Por un lado las mediciones se han realizado con la máxima exactitud posible, no obstante hay errores inevitables debido al factor humano. Por otro lado refiriéndose al instrumento de medida no se consideran errores ya que se ha utilizado un contador de medición para el conteo de vehículos. Se concluye, por tanto que el error cometido en las mediciones de aforo se debe principalmente al error humano.

Los instrumentos utilizados para realizar los aforos han sido un clicker, con el cual se han ido contabilizando los vehículos ligeros, una hoja de aforo en la cual se ha ido apuntando el conteo de vehículos y una videocámara junto con un cronómetro. El cronómetro se ha utilizado para contar los intervalos de tiempo mientras que la videocámara ha sido principalmente útil en la intersección de la Ronda General Mitre con la Calle Ganduxer. Dado que en dicha intersección se encuentran cinco de los tramos estudiados, se ha decidido aprovechar y grabar las mediciones realizadas para posteriormente poder realizar el conteo de vehículos de todos los tramos. Además este procedimiento ha sido útil para obtener varios parámetros como la proporción de vehículos que efectúan giros a la izquierda y derecha (parámetros utilizados más adelante). Se muestra el material utilizado para el aforo en la figura 5.1.

Uno de los elementos utilizados para realizar el aforo de los tramos estudiados es la hoja de aforo. Es una elaboración propia en la cual se anotan para cada intervalo de tiempo estudiado el número de vehículos que pasa por la sección considerada. Estos valores se anotan para cada tipología de vehículo. Para este trabajo se han considerado los siguientes tipos de vehículo durante la clasificación del tráfico:

- Tipo I Bicicletas: vehículos sin motor
- Tipo II Motocicletas: vehículos a motor de dos ruedas
- Tipo II Vehículos ligeros: turismos y camionetas de cuatro ruedas
- Tipo III Vehículos pesados: autobuses y camiones

Los datos obtenidos de las mediciones realizadas se encuentran en los apéndices A y B

En este estudio es de gran interés obtener datos de intensidades tanto para la circulación estable como para la inestable, ya que posteriormente se obtendrá

5.1.2. Datos de velocidades

Las velocidades de este trabajo se han obtenido utilizando una API¹ que ofrece *TomTom Developer Traffic Flow*. Esta API permite hacer uso de un servicio llamado *Flow Segment Data* para obtener la velocidad media espacial y el tiempo medio de recorrido de un tramo en tiempo real.

Para poder utilizar este servicio se debe obtener una clave de uso privada. Este servicio funciona de una forma sencilla. Se establece un punto definido con coordenadas para el cual se hace la petición de datos. A continuación se devuelve una respuesta que contiene varios valores que se explican a continuación. Los resultados obtenidos son aplicables a cualquier punto contenido en un tramo de influencia que TomTom considera homogéneo para el cálculo de velocidades. Este tramo también se define en la respuesta de la API. Es importante destacar que TomTom refresca los datos cada dos minutos y que la sensibilidad del servicio es elevada ya que detecta correctamente el sentido de circulación que se debe considerar, dadas las coordenadas del punto a solicitar.

Los datos obtenidos muestran el error estimado de los datos con un factor que toma valores entre el cero y el uno llamado **confidence**. Se incluyen las coordenadas de los puntos que forman el tramo que TomTom considera homogéneo para el cálculo de la velocidad media y del tiempo de recorrido en el atributo **coordinates**. Además se muestran los tiempos y las velocidades medias libres en tráfico fluido para dicho tramo bajo la etiqueta **freeFlowTravelTime** y **freeFlowSpeed** respectivamente. Los tiempos y velocidades en tiempo real están en los atributos llamados **current** y adicionalmente TomTom clasifica las vías según su prioridad en el atributo **frc**². Un ejemplo de la respuesta del servicio TomTom Flow Segment Data se muestra a continuación en el listado 5.1. Los puntos en los cuales se han pedido los datos y los tramos de influencia que define TomTom se indican en la figura 5.2.

¹Plataforma de servicios HTTP para navegadores y dispositivos móviles.

²En la API de TomTom “frc” significa *Functional Road Class* que permite clasificar las vías en siete tipos. De esta forma la nomenclatura es “FRC” seguido de un valor entre el cero y el seis. Siendo el cero para definir autopistas y autovías y el seis para vías locales. En este caso “FRC5” se refiere a una calle local de gran importancia.

Listado 5.1: Ejemplo de respuesta de TomTom Flow Segment Data

```
1 {"flowSegmentData":
2   {"frc": "FRC5",
3     "currentSpeed": 27,
4     "freeFlowSpeed": 27,
5     "currentTravelTime": 10,
6     "freeFlowTravelTime": 10,
7     "confidence": 0.87,
8     "coordinates":
9       {"coordinate": [
10        {"latitude": 41.401466, "longitude": 2.1364117},
11        {"latitude": 41.401497, "longitude": 2.1361322},
12        {"latitude": 41.40159, "longitude": 2.1358297},
13        {"latitude": 41.401695, "longitude": 2.1357157}
14      ]},
15     "openlr": null,
16     "@version": "1.0.53-mascoma"}
17 }
```

5.1.3. Petición y almacenamiento de los datos de velocidades

Una vez conocido el formato de respuesta que ofrece TomTom, es necesario pedir los datos correctos y almacenarlos para su posterior procesamiento. En este proyecto se ha tenido que trabajar con unos datos de velocidad y tiempo que tienen un formato concreto. No obstante no era de interés utilizar bases de datos relacionales como SQL para guardarlos. Esto se debe a que las bases de datos relacionales tienen un modelo bastante rígido y si la forma de guardar los datos varía, se tiene que utilizar una nueva base de datos. En el presente proyecto se ha utilizado una base de datos no relacional. Esto ha permitido tener la libertad de modificar el almacenamiento de los datos recibidos sin perder el uso de los anteriores.

La petición de los datos a la API de TomTom se ha realizado con NodeJS. NodeJS es un entorno basado en JavaScript y diseñado para back-end. Se ha escogido utilizar este entorno porque es relativamente novedoso y se ha considerado interesante utilizar tecnologías nuevas.

Primeramente se necesitan tener dos conceptos claros, la diferencia entre back-end y front-end. Supóngase como ejemplo una página web en la cual se muestran los próximos eventos de ocio para una ciudad. El *front-end* es lo que el usuario puede ver, es decir, es la apariencia de la página. Front-end por tanto es la capa que permite al usuario interactuar con la página.

Es aquella capa que permite que cuando el usuario rellene un formulario, los campos necesarios sean resultados en rojo, y el botón de enviar no esté habilitado hasta que estos campos sean rellenados. En resumen es lo que el usuario puede ver y “tocar”. El *back-end* es aquella capa que se encarga de los procesos necesarios para que la web en sí funcione. Es decir, es una parte que el usuario no ve, pero es una parte necesaria ya que es aquella que se encarga de que los datos que el usuario ha introducido en el formulario se recopilen, y se envíen a una base de datos para ser guardados, después de que el usuario haya hecho click en el botón “enviar”.

Históricamente Javascript se ha utilizado para front-end y la novedad reside en que con este entorno es posible utilizar Javascript para procesos back-end. *Javascript* es un lenguaje diseñado para ser utilizado en front-end. Por esta razón el entorno Node JS ha ido ganando interés de los desarrolladores y al ser una tecnología nueva se ha escogido para ser utilizada en este proyecto.

El proceso de la elección de la base de datos ha sido simple y directo. Ya que Node JS está basado en Javascript, se ha necesitado una base de datos compatible con este lenguaje y que ofrezca una buena compatibilidad. Actualmente existen diversas opciones de bases de datos que sean aconsejables utilizar con Node JS. Entre ellas se encuentran PostgreSQL, CouchDB y MongoDB. En este proyecto se ha utilizado MongoDB porque se ha observado una gran acogida entre los desarrolladores así como por la gran cantidad de documentación que está disponible acerca de esta base de datos y su uso. A continuación se adjunta el código con el cual se han realizado las peticiones al servidor de TomTom.

Listado 5.2: Ejemplo de petición de datos a la API de TomTom Flow Segment Data

```
1 // --- Importación de paquetes necesarios
2 var moment = require('moment');
3 var express = require('express');
4 const https = require('https');
5 var mongoose = require('mongoose');
6 const request = require('request');
7 var db = require('mongodb');
8 var streets = require('./streets/streets.js');
9 var apiKey = require('./private/keys.js');
10
11 mongoose.Promise = global.Promise;
12
13 // --- Ajustes para guardar logs
```

```
14 var logParams = {
15   consoleOutput : true,
16   consoleOutputLevel: ['DEBUG', 'ERROR', 'WARNING'],
17   dateTimeFormat: "DD-MM-YYYY HH:mm:ss.S",
18   outputPath: "./logs/",
19   fileNameDateFormat: "DD-MM-YYYY",
20   fileNamePrefix: "request-data-asc "
21 };
22 var log = require('noogger').init(logParams);
23 var port = process.env.PORT || 3006;
24 var app = express();
25
26 // --- Establecer conexión con la base MongoDB
27 mongoose.connect('mongodb://localhost/streets-data-asc', {
28   useMongoClient: true }, function(err){
29   if(!err){
30     log.info('OK! Connected to MongoDB');
31   }else {
32     log.error('Not connected to MongoDB: ' + `${err}`);
33   }
34 });
35
36 // --- Creación de un esquema de los datos a guardar para
37 // crear modelos
38
39 var Schema = mongoose.Schema,
40   ObjectId = Schema.ObjectId;
41
42 var flowSegmentData = new Schema({
43   frc: {type:String, default: ''},
44   currentSpeed: {type:Number, default: ''},
45   freeFlowSpeed: {type:Number, default: ''},
46   currentTravelTime: {type:Number, default: ''},
47   freeFlowTravelTime: {type:Number, default: ''},
48   confidence: {type:Number, default: ''},
49   coord_lat: {type:String, default: ''},
50   coord_long: {type:String, default: ''},
51   name:{type:String, default: ''},
52   date: { type: Date, default: Date.now }
53 });
54
55 // la variable flowSegmentData será utilizada para crear más
56 // documentos
57 var flowSegmentData = mongoose.model('flowSegmentData',
58   flowSegmentData);
59
60 // --- petición de datos a TomTom para las calles definidas
61 // en streets
62 var coordLong;
```

```
58 var coordLat;
59
60 function runApp(err){
61   try {
62     flowRequest(streets);
63     var now = moment().format('DD/MM/YYYY, h:mm:ssA');
64     log.info('Getting data on: ' + `${now}`);
65
66   } catch (e) {
67     log.error('Error running the app in runApp(): ' + `${err}`);
68   };
69
70   // ejecutar el código cada
71   // 5.000 equivale a 5 segs, entonces el intervalo de 5 min
72   // es 5*60*1000
73   setTimeout(runApp, 300000);
74 }
75 runApp();
76
77 function flowRequest (data, err){
78   //parámetros para la petición http
79   coordLat = data.mitre70Asc.coordLat;
80   coordLong = data.mitre70Asc.coordLong;
81   pointName = data.mitre70Asc.pointName;
82   saveDocs(coordLat, coordLong, pointName);
83 }
84
85 function saveDocs (coordLat, coordLong, pointName){
86   request(
87     { 'url': 'https://api.tomtom.com/traffic/services/4/
88       flowSegmentData/absolute/14/json?key='+`${apiKey}`+'&point
89       ='+`${coordLat}`+',', '+`${coordLong}`',
90     },
91     (err, res, body) => {
92       if (!err) {
93         var response = JSON.parse(body);
94         var responseMapped = {
95           frc: response.flowSegmentData.frc,
96           currentSpeed: response.flowSegmentData.currentSpeed
97         },
98         freeFlowSpeed: response.flowSegmentData.
99         freeFlowSpeed,
100         currentTravelTime: response.flowSegmentData.
101         currentTravelTime,
102         freeFlowTravelTime: response.flowSegmentData.
103         freeFlowTravelTime,
104         confidence: response.flowSegmentData.confidence,
```



```
99         coord_lat: coordLat,
100         coord_long: coordLong,
101         name: pointName
102     };
103     // crear un documento en la base de datos para cada
objeto recibido en respuesta
104     flowSegmentData.create(responseMapped, function(err){
105         if (!err) {
106             // el documento se ha creado con éxito
107             log.info('1 doc created');
108         } else {
109             log.error('Error creating flowSegmentData
document: ' + `${err}`);
110         }
111     });
112     } else {
113         log.error('Error doing the http request: ' + `${err}`);
114     }
115 }
116 );
117 }
118
119 var now = moment().format('DD/MM/YYYY, h:mm:ssA');
120 log.info('Tomtom data requested on: ' + `${now}`);
121
122 app.listen(port);
```

5.2. Tratamiento de datos

En esta sección se explica el procedimiento que se ha seguido a la hora de tratar los datos que se han obtenido previamente. El resultado primeramente se desea representar en el gráfico intensidad-tiempo de viaje. El objetivo es representar en dichos ejes los puntos reales de las mediciones obtenidas y la curva BPR estimada, para ver la relación que guardan entre sí. Se debe tener en cuenta que la formulación BPR debe ser utilizada con intensidades horarias y por tanto los resultados primero tienen que representarse así. A continuación se introducen los parámetros de la fórmula BPR para representar la curva en los ejes correctos.

5.2.1. Datos reales: mediciones tomadas

Las mediciones para este proyecto se han realizado en el transcurso de una hora y se han dividido en intervalos de cinco minutos. Este intervalo se debe a dos razones, por un lado intervalos más reducidos facilitan el conteo

de vehículos así como su clasificación en directo y por otro lado es idóneo considerar las velocidades medias obtenidas con TomTom en un intervalo pequeño ya que éstas se actualizan cada dos minutos, luego representan una velocidad que está relacionada con los últimos dos minutos de circulación en lugar de verse influenciada por la última hora de tráfico. Se ha decidido redondear el intervalo a cinco minutos en lugar de a dos, como en TomTom. Para el análisis de los datos y su tratamiento primero se han pasado todas las mediciones manuales que se han obtenido a un formato digital sobre una hoja de cálculo. A continuación se han obtenido los siguientes parámetros:

- I_{60} : Intensidad o flujo total obtenido en una hora de medición. Es la suma de los vehículos que han pasado por una sección en el transcurso de cinco minutos. Se ha utilizado la ponderación de *PCE*.³
- I_5 : Intensidad máxima en un intervalo de cinco minutos. Se selecciona la intensidad mayor que se ha obtenido entro de una hora de estudio, representada para el intervalo de cinco minutos.
- *FHP*: Factor de hora punta. Factor calculado del mismo modo que se ha mencionado en el capítulo 2.1.2
- Porcentaje de vehículos pesados, valor utilizado posteriormente para el cálculo de la capacidad. Es el cociente entre la suma de los vehículos pesados, los cuales incluyen camiones y autobuses, respecto el total de los vehículos.

Tanto estos parámetros como los datos horarios de los cuales se han obtenido se encuentran representados con el siguiente formato como el indicado en la tabla 5.3. Dichas tablas con los datos medidos en la vía pasados a formato digital se adjuntan en el apéndice B

A continuación se han necesitado añadir las respuestas obtenidas con la API de TomTom a cada una de las mediciones de cinco minutos. Se han transferido los datos guardados en la base de datos local MongoDB a la hoja de

³*Passenger Car Equivalent* o PCE es una ponderación que se utiliza en ingeniería del tráfico para representar el impacto que tienen ciertos tipos de vehículo sobre la circulación. De esta forma la intensidad total se representa con un equivalente a un vehículo ligero, comúnmente un turismo. Dichas ponderaciones han sido las siguientes:

- Bicicleta: 0,2
- Motocicleta: 0,5
- Camioneta: 3,5
- Vehículos pesados: camión y autobús: 3,5

CAPÍTULO 5. PROCEDIMIENTO

Día fecha	Hora		B I	M II	Veh. Lig II (4 ruedas)		Veh. Pes III		Total	I_5	I_{60}
	De	A	Bicicletas	Motos	Coches	Camionetas	Camiones	Autobuses			
	9:00	9:05	0	98	101	3	1	4	178	186	1877
	9:05	9:10	0	42	104	5	0	7	167		
	9:10	9:15	0	64	122	4	0	5	186		
	9:15	9:20	0	51	113	7	0	3	174		
	9:20	9:25	0	32	103	3	1	3	144		
	9:25	9:30	0	66	110	2	0	4	164		
	9:30	9:35	0	42	102	2	0	3	141		
	9:35	9:40	0	56	99	3	0	3	148		
	9:40	9:45	0	50	106	1	0	4	149		
	9:45	9:50	0	48	97	4	0	5	153		
	9:50	9:55	0	53	91	1	0	4	135		
	9:55	10:00	0	41	99	2	0	4	141		
Total _{1h}			0	643	1247	37	2	49	1877	FHP	0,84

Figura 5.3: Tabla que indica ejemplo horario. Fuente: elaboración propia.

cálculo. Posteriormente se obtienen pares de datos con el formato (*intensidad, tiempo de viaje*) o siguiendo la nomenclatura de las tablas de cálculo utilizadas (I_{60}, T). Dichos datos se pueden representar en los ejes adecuados como se indica a continuación en la figura 5.4.

Seguidamente es necesario obtener la curva teórica BPR para poder ajustarla con los parámetros α y β .

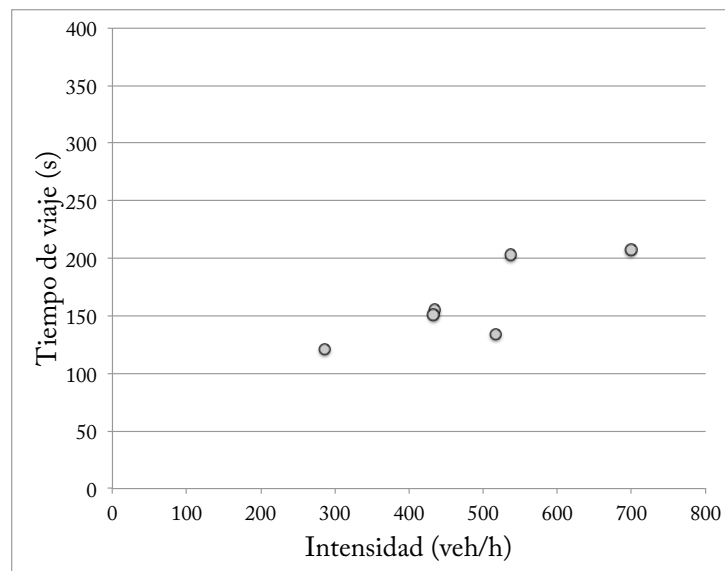


Figura 5.4: Representación obtenida tras el tratamiento de los datos horarios. Fuente: elaboración propia.

5.2.2. Curva teórica y sus parámetros

La expresión de la relación flujo-tiempo de viaje de BPR es la siguiente:

$$T(I) = T_0 \left(1 + \alpha \left[\frac{I}{C} \right]^\beta \right) \quad (5.1)$$

Donde:

- T_0 indica el tiempo de viaje en condiciones de circulación libre
- I indica la intensidad determinada
- C indica la capacidad de la vía
- α y β son parámetros a calibrar

El primero de los parámetros, T_0 se ha obtenido de las respuestas de TomTom, ya que es uno de los datos indicados bajo la etiqueta de *freeFlowTravelTime* expresado en segundos (ver listado 5.3).

El segundo parámetro de la expresión BPR es una intensidad determinada, I . Dicha intensidad es el resultado de las mediciones. En este caso se utiliza la intensidad anteriormente definida bajo la notación I_{60} pues es la horaria. Los parámetros α y β son el objeto de la calibración y la C , es decir la capacidad, se necesita obtener.

Listado 5.3: Tiempo de viaje en condiciones de circulación libre de TomTom Flow Segment Data

```
1 {"flowSegmentData": {  
2   ...  
3   "freeFlowTravelTime":10,  
4   ...  
5   }  
6 }
```

Cálculo de la capacidad

Existen diversas formas de calcular la capacidad de una vía. Generalmente se toman como punto de partida las recomendaciones del *Highway Capacity Manual* [8]. De este modo la capacidad se puede calcular tanto para una vía como para una intersección. El cálculo de la capacidad para una intersección a priori no es necesario en este proyecto ya que se toman segmentos considerados homogéneos de una vía y no se tiene en cuenta la intersección de

vías en sí. No obstante se ha considerado interesante realizar el cálculo de la capacidad de la intersección para comparar el valor obtenido de este cálculo con el valor tomado como capacidad de la vía⁴.

Capacidad de una intersección La capacidad de una intersección se puede determinar de varias maneras. Las que se han utilizado en este proyecto son las que se mencionan a continuación.

Tomando los ciclos semafóricos de la intersección se dividen en la fase verde y roja, siendo la duración del ciclo la suma de ambas fases, expresadas en segundos. De este modo la expresión de la capacidad es como sigue [8]:

$$C = S \frac{G}{T} \quad (5.2)$$

Donde:

- C indica la capacidad de la intersección expresada en veh/h
- S indica la intensidad de saturación, expresada en veh/h
- G indica la duración de la fase verde del ciclo semafórico expresada en *segundos*
- T indica la duración total del ciclo semafórico expresada en *segundos*

Adicionalmente la intensidad de saturación S se obtiene a partir de otra expresión adicional, la cual tiene en cuenta varias características de la intersección estudiada.

$$S = S_0 N f_w f_{HV} f_g f_p f_{bb} f_a f_{LU} f_{LT} f_{RT} \quad (5.3)$$

Donde:

- S_0 saturación básica por carril por hora ($veh/h/carril$)⁵. Generalmente como valor por defecto se utiliza el 1900.

⁴Esta comparación sólo se ha realizado en los tramos de General Mitre que interesan con la calle Ganduxer, ya que es el único cruce considerado como tal en este proyecto. El cruce de General Mitre con la calle Mandri no se ha considerado a efectos de cálculo de capacidades debido a que la intersección de estas dos vías es de una complejidad mayor y los tramos considerados por TomTom tanto de General Mitre como de Mandri no llegan a dicha intersección sino que acaban ligeramente antes de llegar a ella.

⁵Los vehículos en que se expresa la saturación básica son vehículos equivalentes a vehículos ligeros, tal y como se había indicado en la sección 5.2.1 con el PCE.

- N es el número de carriles
- f_w es el factor de corrección por ancho de carril. Se define como:

$$f_w = 1 + \frac{w - 12}{30} \quad (5.4)$$

$$f_w = \frac{5,62 + w}{9,37} \quad (5.5)$$

Donde w indica el ancho del carril expresado en *pies* en la primera expresión y en la segunda en *metros*.

- f_{HV} es el factor de corrección por vehículos pesados. Se define como sigue:

$$f_{HV} = \frac{100}{100 + \%HV(E - 1)} \quad (5.6)$$

Donde en este caso E representa el factor de equivalencia de un vehículo pesado en vehículo ligero. Para el uso de esta formulación en concreto se debe utilizar el valor de E igual a 2,00. El valor del porcentaje de vehículos pesados $\%HV$ debe ser expresado por carril.

- f_g es el factor de corrección por inclinación de la vía y se calcula a partir de la siguiente expresión siendo $\%G$ el valor de la inclinación:

$$f_g = 1 - \frac{\%G}{200} \quad (5.7)$$

- f_p es el factor de corrección por aparcamiento, el cual se define como:

$$f_p = \frac{N - 0,1 - \frac{18N_m}{3600}}{N} \quad (5.8)$$

Donde N ya se había definido anteriormente como número de carriles y N_m es el valor de aparcamientos realizados en un carril por hora. Adicionalmente se establece que si no hay estacionamientos, el valor de f_p es la unidad.

- f_{bb} es el factor de corrección por bloqueo de autobús. Este factor debe ser mayor o igual a 0.050 y se define tal que:

$$f_{bb} = \frac{N - \frac{14,4N_b}{3600}}{N} \quad (5.9)$$

Siendo N_b el número de autobuses que realizan parada durante una hora⁶.

- f_a es el factor de corrección por tipo de área. Definido como 0.900 en áreas céntricas y de negocio y 1.000 en las demás áreas.
- f_{LU} es el factor de corrección por uso de carril, el cual se define de la siguiente manera:

$$f_{LU} = \frac{v_g}{v_{g1}N} \quad (5.10)$$

Donde v_g la intensidad horaria por todos los carriles de la vía considerada, v_{g1} la intensidad horaria mayor de un carril de la vía estudiada, y N el número de carriles⁷.

- f_{LT} es el factor de corrección por giros a la izquierda. Su valor depende de si el carril desde el cual se efectúa el giro es compartido o exclusivo para tal finalidad.

$$f_{LT\text{exclusivo}} = 0,95 \quad (5.11)$$

$$f_{LT\text{compartido}} = \frac{1}{1 + 0,05P} \quad (5.12)$$

Siendo P definido como la proporción de giros en el grupo de carriles total.

- f_{RT} análogamente al factor anterior este es para los giros efectuados a la derecha:

$$f_{RT\text{exclusivo}} = 0,85 \quad (5.13)$$

$$f_{RT\text{compartido}} = 1 - 0,15P \quad (5.14)$$

Capacidad y velocidad de circulación Es posible determinar la capacidad de un carril en función de la velocidad de circulación y la separación entre los vehículos, según la siguiente expresión:

$$C = \frac{V}{s} 1000 \quad (5.15)$$

⁶En el presente proyecto dicho valor ha excluido las paradas realizadas por los autobuses escolares ya que realizan sus trayectos únicamente por la mañana y por la tarde. Por ello se han considerado los autobuses de transporte público.

⁷En este proyecto no se han considerado las mediciones de aforo por carriles y por tanto se ha considerado el valor de este factor como la unidad

Donde V es la velocidad de circulación expresada en km/h y s es la separación media mínima expresada en *metros* entre dos vehículos consecutivos. Esta separación se determina entre las partes frontales de los vehículos. Nótese que la separación no es independiente de la velocidad de circulación, ya que si se considera una separación pequeña únicamente es posible si la velocidad de circulación es reducida. Con lo cual a medida que la velocidad aumenta también lo hace la separación media entre vehículos. En general se consideran dos expresiones para determinar la separación media:

$$s = 6 + \left(\frac{V}{3,6} \right) t_{percepcin} \quad (5.16)$$

$$s = a + bV + cV^2 \quad (5.17)$$

Donde el $t_{percepcin}$ es el tiempo de percepción de un obstáculo en la vía. Generalmente se considera de media un valor tal tiempo igual a 2 segundos. La primera expresión debe ser ajustada pero existen valores por defecto para los parámetros a, b, c . De modo que, es posible tomar uso de la siguiente expresión: [7]

$$s = 5,35 + 0,22v + 0,00094v^2 \quad (5.18)$$

Valores recomendados de la capacidad por HCM A continuación se presentan las tablas de las recomendaciones del manual HCM. Estas tablas ayudan a clasificar las vías urbanas según varios factores. Primeramente se debe asignar una clase a la vía estudiada. En este caso los tramos de La Ronda General Mitre se consideran de arteria principal y los tramos de Ganduxer y Mandri como menores. Tratándose todos los tramos de urbanos, según la tabla 5.1 se llegan a clasificar los tramos de General Mitre como Clase III o IV y los tramos de Ganduxer y Mandri como Clase IV. Además se indica que las vías urbanas son aquellas cuya velocidad límite son los $40 - 55 km/h$, lo cual encaja en la descripción. No obstante, según los resultados recibidos de TomTom indicados en el apéndice B la velocidad libre de los tramos estudiados en este proyecto no llega a estos valores.

Seguidamente se presenta una segunda tabla que recoge los volúmenes de circulación para cada tipo de clase de vía y nivel de servicio (ver tabla 5.2). Cabe destacar que dicha tabla está basada en ciertas consideraciones, las cuales para las clases III y IV son las descritas en la tabla 5.3. Es interesante destacar que estas son algunas de todas las consideraciones tomadas pero estas son las únicas que se han podido cuantificar tras las mediciones manuales

y por tanto solamente las mencionadas en la presente tabla se consideran relevantes a efectos de comparación.

Tabla 5.1: Clasificación de vías urbanas según su funcionalidad. Fuente: HCM, Capítulo 10.

Categoría vía	Categoría funcional	
	Arteria principal	Arteria secundaria
Alta velocidad	I	No aplicable
Suburbana	II	II
Intermedia	II	III o IV
Urbana	III o IV	IV

Tabla 5.2: Volúmenes de servicio para vías urbanas según clase y número de carriles. Fuente: HCM, Capítulo 10.

Carriles	Volúmenes (veh/h)		
	C	D	E
Clase III			
1	570	800	830
2	1230	1610	1680
3	1930	2430	2520
4	2650	3240	3360
Clase IV			
1	No aplicable	660	780
2	No aplicable	1460	1570
3	No aplicable	2260	2370
4	No aplicable	3050	3170

Tabla 5.3: Condiciones consideradas para la asignación de volúmenes de las vías. Fuente: HCM, Capítulo 10.

	Clase	
	III	IV
Velocidad libre (km/h)	55	45
Ciclo total (s)	80	70
Ratio efectivo (fase verde)	0.45	0.45
Índice de saturación	1750	1700
Factor de Hora Punta	0.92	0.92

Capacidad a partir de la relación fundamental Un método adicional para estimar la capacidad de la vía es utilizar las mediciones realizadas previamente. Por un lado durante las mediciones de los tramos se ha ido observando un cambio entre circulación estable y la inestable de modo que visualmente se percibía cierta congestión con cierto volumen de vehículos. Por otro lado los datos tomados indican intensidades horarias obtenidas durante las horas de análisis. Bien es cierto que solamente unas pocas franjas horarias se han podido obtener, se ha procurado realizar las mediciones durante las horas con circulación más intensa para poder observar el congestionamiento de las vías. Por lo tanto, una forma adicional de estimar la capacidad de las vías es analizar los datos obtenidos tras las mediciones. Así mismo si se requiere una forma más visual de realizarlo, se pueden representar los datos obtenidos como una relación de velocidad-intensidad, y de esta forma obtener el pico en el cual hay un cambio de circulación, si se ha registrado. De esta forma es posible observar cierta intensidad de circulación para la cual el tiempo de viaje aumenta de forma brusca y también la intensidad horaria máxima registrada puede dar una idea del valor que se está buscando.

5.2.3. Cálculo de la capacidad

Una vez considerados los diversos métodos para obtener la capacidad, parámetro necesario para generar la curva BPR, se procede al cálculo para cada tramo de vía. En esta sección se muestran los resultados recogidos tras la aplicación de los diferentes métodos y a continuación se considera un valor final para la capacidad de cada vía que se recoge en una tabla resumen.

Capacidad en una intersección

Este método se ha considerado aplicable únicamente a los tramos siguientes ya que estos tramos tal y como se interpreta por TomTom son tramos que llegan justamente hasta la intersección que les delimita, como se indica en la figura 5.2. Se ha considerado interesante poder obtener la capacidad de la intersección y poder compararla con las demás capacidades obtenidas, ya que la capacidad de la intersección afecta a la capacidad de la vía.

- Mitre 90 ASC
- Mitre 90 DESC
- Mitre 70 ASC
- Mitre 70 DESC
- Ganduxer ASC

Por lo tanto los demás tramos quedan excluidos ya que no se extienden hasta la intersección que tienen y también porque la intersección General Mitre - Mandri es algo más compleja por su geometría (ver figura 5.5b).



(a) Intersección de las calles Mandri y Ronda General Mitre



(b) Intersección de las calles Mandri y Ronda General Mitre

Figura 5.5: Fotografías de las intersecciones de los tramos estudiados. Fuente: elaboración propia.

En la tabla 5.4 se muestran los valores de los parámetros necesarios para llevar a cabo el cálculo. Se destacan ciertos comentarios y/o consideraciones que se han tomado para los parámetros:

- T y G : los valores expresados en *segundos* del ciclo semafórico se han obtenido como media de las mediciones realizadas *in situ*.
- f_w : los valores de este factor se han calculado a partir de la medición del ancho de la vía con el uso de Vissir del Instituto Cartográfico de Cataluña.
- f_{HV} y f_{bb} : obtenidos a partir de las mediciones realizadas.
- f_g : se han considerado con inclinación nula los tramos de General Mitre mientras que la inclinación del tramo de Ganduxer sí se ha considerado.
- f_p : no es posible realizar parada en los tramos, por tanto el valor de ese factor es la unidad.
- f_{LU} : se ha tomado el valor por defecto por falta de información.
- f_{LT} y f_{RT} : Los giros a la izquierda no están permitidos en los tramos de General Mitre y por tanto toman el valor uno. Los giros permitidos se han evaluado en base a las mediciones tomadas. El factor de giro a la derecha en el tramo **Mitre 90 DESC** se ha tomado como uno porque la proporción de vehículos que efectúan el giro es despreciable.

Capacidad y velocidad de circulación

Para el siguiente cálculo se ha evaluado la separación de ambas formas, tal y como se ha indicado anteriormente en el apartado 5.2.2 y se ha tomado para el cálculo el valor de la velocidad media obtenida durante la hora con más intensidad de circulación para cada tramo. A continuación se ha evaluado el parámetro de separación s en *segundos* de las dos formas descritas anteriormente y se han comparado los resultados de la capacidad obtenida. Se adjuntan los resultados obtenidos en la tabla 5.5.

Nótese que utilizando la aproximación empírica mostrada en 5.18 las capacidades obtenidas son sobreestimadas. Además las capacidades que se encuentran más próximas a las intensidades máximas obtenidas en las mediciones pertenecen a la columna de resultados uno, $C(t, V)$. Por tanto se escogen dichas capacidades. Adicionalmente se establece sólo un valor para cada sentido de los tramos de Ronda General Mitre, ya que los tramos consecutivos estudiados tienen condiciones geométricas similares y la composición del tráfico también. Por simplificación, pues, se considera un mismo valor para cada sentido, que se recoge en la tabla final 5.7.

Tabla 5.4: Resumen del valor de los parámetros a utilizar en la estimación de la capacidad para una intersección.

Parámetros	Tramos				
	M 90ASC	M 90DESC	M 70ASC	M 70DESC	G ASC
T	88	88	88	88	88
G	43	43	43	43	45
S	5162	5098	5030	5098	4640
S_0	1900	1900	1900	1900	1900
N	3	3	3	3	3
f_w	0.92	0.92	0.92	0.92	0.88
f_{HV}	0.9993	0.9992	0.9993	0.9993	0.9989
f_g	1.00	1.00	1.00	1.00	0.997
f_p	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
f_{bb}	0.985	0.973	0.985	0.973	0.979
f_a	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
f_{LU}	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
f_{LT}	1.00	1.00	1.00	1.00	0.949
f_{RT}	1.00	1.00	0.974	1.00	1.00

Recomendaciones HCM

Se han tomado los tramos como vías urbanas convencionales arteriales. Los tramos de Ronda General Mitre se han considerado como principales mientras que los de las calles Mitre y Ganduxer como secundarias. Por tanto los tramos toman las clases III y IV según el manual HCM. Los tramos considerados clase III (General Mitre) toman una capacidad aproximada de valor $2430veh/h$ para un total de tres carriles, considerando un nivel de servicio D. Los tramos clasificados como IV (Calles Ganduxer y Mandri⁸) toman un volumen de vehículos del valor $2260veh/h$ para la vía de tres carriles, en este caso la Calle Ganduxer, y un valor de $1460veh/h$ para la vía de dos carriles de Mandri, ambas para un nivel de servicio D⁹.

⁸Según el manual HCM las vías urbanas consideradas principales pueden clasificarse tanto como Clase III y IV, por tanto los tramos de General Mitre también pueden considerarse como clase IV

⁹El nivel de servicio se ha tomado como D por dos razones. En las vías clasificadas como Clase III se considera un volumen de vehículos para los niveles de servicio C, D, y E, según la tabla 5.2 mientras que en la Clase IV únicamente se aplica a niveles D y E. Por tanto en el caso de la Clase III se ha escogido un valor de capacidad intermedio, es decir para el nivel D. En el caso de la Clase IV se ha escogido el mismo que para la clase anterior.

Tabla 5.5: Resumen de los parámetros a utilizar en la estimación de la capacidad con la velocidad de circulación.

Tramo	Parámetros						
	$C(t, V)$ (veh/h)	$C_N(t, V)$ (veh/h/c)	$C(V)$ (veh/h)	$C_N(V)$ (veh/h/c)	$s(t, V)$ (s)	$s(V)$ (s)	V (km/h)
Man ASC	1890	943	2560	1282	12.61	9.28	11.9
Man DESC	2080	1040	2780	1388	14.22	10.66	14.8
M 121 ASC	2560	854	3480	1162	11.41	8.39	9.75
M 121 DESC	1610	536	2100	700	8.55	6.55	4.59
M 90 ASC	3300	1098	4310	1438	15.40	11.76	16.92
M 90 DESC	1840	613	2430	812	9.10	6.87	5.58
M 70 ASC	3720	1241	4490	1496	19.33	16.04	24
M 70 DESC	2770	924	3770	1256	12.34	9.08	11.41
G ASC	3690	1230	4680	1560	18.96	14.95	23.33

Relación fundamental y mediciones

Se procede a discutir cuáles son los volúmenes que se han tomado para cada tramo en base a las mediciones obtenidas y mostradas en el apéndice B. Primeramente se observan unas intensidades mayores en el sentido descendente de La Ronda General Mitre en comparación con la ascendente. Por tanto se escoge la intensidad máxima obtenida en estos tramos en sentido descendente como valor representativo para el sentido ascendente de los tramos de General Mitre. Además durante las mediciones se ha notado una mayor congestión en los tramos **Mitre 70** que en los demás y por lo tanto cada tramo de Ronda General Mitre recoge diferentes valores en la tabla resumen. En el caso de las Calles Mandri y Ganduxer se ha observado cierta congestión durante las mediciones, no obstante dicha congestión o circulación interrumpida se ha producido durante intervalos breves y por tanto se ha considerado que las intensidades horarias máximas obtenidas en las mediciones no alcanzan el valor de la capacidad de la vía. Es decir, sí se han obtenido intensidades pico en intervalos de cinco minutos pero no se consideran relevantes para estimar la capacidad, las intensidades horarias obtenidas porque durante las horas de medición, en general, la vía no ha llegado a congestionarse y por tanto no se ha alcanzado la intensidad suficiente para poder estimar la capacidad.

Los valores escogidos como representativos se recogen en la tabla 5.6.

Tabla 5.6: Tabla resumen de las intensidades máximas obtenidas en las mediciones.

Tramo	Relación fundamental y mediciones (veh/h)
Man ASC	No aplicable
Man DESC	No aplicable
M 121 ASC	1780
M 121 DESC	1780
M 90ASC	1880
M 90DESC	1880
M 70ASC	2240
M 70DESC	2240
G ASC	No aplicable

Resumen de los valores obtenidos

La tabla 5.7 presenta los valores obtenidos tras utilizar los diferentes métodos para estimar la capacidad de las vías. Seguidamente se discuten los resultados y se muestran los escogidos como válidos en una última tabla 5.8. Obsérvese que para los tramos de las calles Mandri y Ganduxer se han tomado los valores recomendados por HCM. En cambio para los tramos de La Ronda General Mitre se han considerado los obtenidos en las mediciones, ya que, tal y como se ha mencionado anteriormente, se ha observado congestión con dichas intensidades y se ha considerado que las recomendaciones de HCM para el caso de estos tramos en concreto sobreestiman la capacidad de la vía.

Tabla 5.7: Tabla resumen de todas las capacidades calculadas para los tramos.

Tramo	Cálculos (<i>veh/h</i>)			
	Intersección semaforizada	Velocidad y separación	Valores HCM	Relación fundamental y mediciones
Man ASC	No aplicable	1980	1460	No aplicable
Man DESC	No aplicable	2080	1460	No aplicable
M 121 ASC	No aplicable	2560	2430	1780
M 121 DESC	No aplicable	1610	2430	1780
M 90 ASC	2520	3300	2430	1880
M 90 DESC	2490	1840	2430	1880
M 70 ASC	2460	3720	2430	2240
M 70 DESC	2490	2770	2430	2240
G ASC	2370	3690	2260	No aplicable

Tabla 5.8: Tabla resumen de los valores escogidos de capacidad estimada para los tramos.

Tramo	Valor de capacidad (<i>veh/h</i>)
Man ASC	1460
Man DESC	1460
M 121 ASC	1780
M 121 DESC	1780
M 90ASC	1880
M 90DESC	1880
M 70ASC	2240
M 70DESC	2240
G ASC	2260

5.2.4. Obtención de la curva BPR

Como resultado se obtiene una curva BPR indicada en la figura 5.6, utilizando los parámetros α y β estándar por el momento. Este es el punto de partida de la estimación de dichos parámetros. Para estimar la curva BPR se pueden tomar dos caminos diferentes [9]. El primero es establecer una capacidad de la vía en base a tablas y/o expresiones empíricas. A continuación se debe aproximar el parámetro α para las demandas pequeñas. El parámetro β , por el contrario, refleja cómo incrementa el tiempo de viaje cuando la demanda se encuentra próxima a la capacidad de la vía.

El segundo método para estimar los parámetros de BPR es encontrar aquella intensidad que hace que se duplique el tiempo de viaje respecto al de circulación libre y utilizar dicho valor como capacidad. Esto implica que el parámetro α sería igual a la unidad, por lo tanto la curva quedaría definida únicamente con una variable a estimar:

$$T(I) = T_0 \left(1 + \left[\frac{I}{C} \right]^\beta \right) \quad (5.19)$$

En el capítulo siguiente se presentan los resultados obtenidos tras la estimación de α y β .

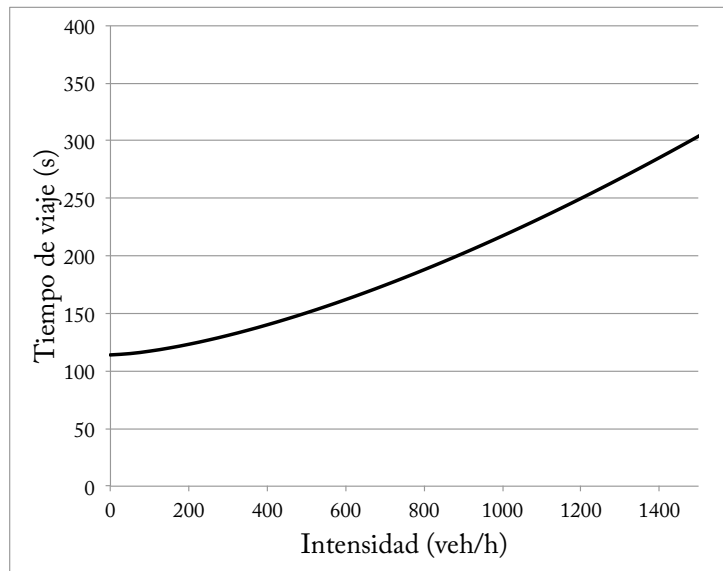


Figura 5.6: Ejemplo de una curva BPR para cierta capacidad, por el momento sin calibrar. Fuente: elaboración propia.

Capítulo 6

Resultados

Seguidamente se presentan las tablas que recogen los coeficientes de corrección y parámetros para el cálculo de la capacidad que se han tenido en cuenta para los tramos estudiados.

6.1. Cálculo del error

Este proyecto tiene como objetivo estimar la curva intensidad-tiempo de viaje a partir de datos reales obtenidos a con mediciones, calibrando los parámetros α y β de la expresión 5.19. Por lo tanto, se debe tener en cuenta en los resultados el error obtenido con esta estimación. Ya se ha mencionado anteriormente la existencia de cierto error humano en las mediciones así como un error en los datos que se obtienen como resultado del servicio de TomTom.

El error de la respuesta de TomTom se cuantifica de una forma desconocida ya que forma parte de su algoritmo, no obstante el índice de fiabilidad de los datos que ofrecen, es público y se devuelve en la respuesta bajo la etiqueta de `confidence` como se observa en el listado 6.1.

Listado 6.1: Índice de fiabilidad de respuesta de TomTom Flow Segment Data

```

1 {"flowSegmentData":
2   {
3     ...
4     "confidence":0.87,
5     ...
6   }
7 }

```

Por lo tanto, este parámetro indica la fiabilidad de los datos obtenidos de TomTom. En general este índice toma valores entre 0,87 y 0,99. No obstante algunas de las peticiones realizadas han devuelto valores más bajos. La media de este índice, obtenida de todas los datos devueltos por TomTom¹, se presenta a continuación en la figura 6.1. Se concluye que un 47 % de las respuestas que se han obtenido de TomTom, se consideran con una fiabilidad superior al 90 %.

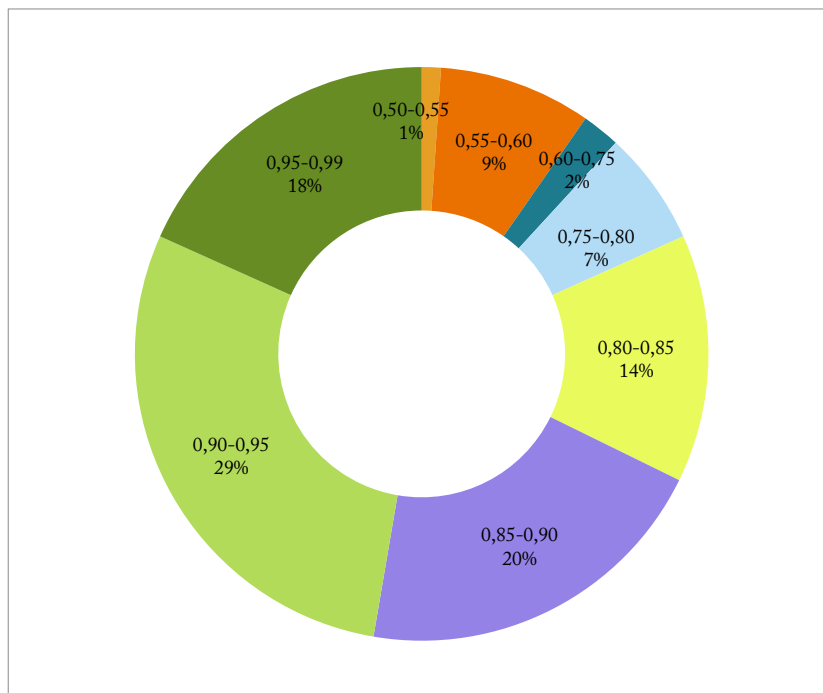


Figura 6.1: Proporción de rangos que toma el índice de fiabilidad de TomTom.

El error humano cometido en las mediciones no se puede cuantificar pero

¹De un total de 642 datos utilizados de TomTom FlowSegmentData

sí se han obtenido unos indicadores para representar cuán fiable es la estimación de este proyecto.

Una forma de representar la calidad de los resultados es conocer su error. Para conocer dicho error es necesario comparar dos resultados entre sí. Generalmente se comparan datos reales con mediciones tomadas. En este caso se consideran reales las medidas que se han tomado estudiando los tramos y las respuestas obtenidas de TomTom. Estos datos se comparan con la curva BPR encontrada. De este modo se presenta el *error absoluto* como la diferencia entre los valores obtenidos de TomTom y los valores generados con la curva BPR. Los valores que se comparan son los tiempos de viaje expresados en segundos.

$$\epsilon_a = T_{TomTom} - T_{BPR} \quad (6.1)$$

El error absoluto a pesar de indicar la precisión de la estimación BPR, no es un indicador intuitivo ya que TomTom asigna diferentes tiempos de viaje en circulación libre a diferentes tramos. Estos tiempos de viaje se indican en una tabla resumen al final de este capítulo. Por tanto, no es suficiente utilizar este error como forma de representar la certeza de la estimación. Por esta razón junto con los resultados de cada tramo se adjunta el *error relativo* resultante según las intensidades evaluadas. El error relativo no tiene unidades sino que se expresa en porcentaje, lo cual permite indicar la calidad de la estimación fácilmente. El error relativo se ha considerado de la siguiente forma:

$$\epsilon_r = \frac{T_{TomTom} - T_{BPR}}{T_{TomTom}} 100 \% = \frac{\epsilon_a}{T_{TomTom}} 100 \% \quad (6.2)$$

Este error está representado para cada uno de los tramos estudiados en este proyecto y se adjunta a continuación. Se incluyen las curvas obtenidas del tiempo de viaje, velocidad y error relativo. Por último se añade la composición del tráfico de cada una de las mediciones realizadas así como la composición media.

6.2. Tramo Mandri ASC

Los parámetros pertenecientes a este tramo se recogen en la siguiente tabla. Durante las mediciones de este tramo se ha observado una circulación poco interrumpida y no muy intensa. Se trata de una vía de dos carriles que contiene el itinerario de dos líneas de autobús público, una de ellas con origen

en el tramo aguas arriba. Se presenta circulación de algunas camionetas por la mañana para abastecer los supermercados cercanos y la circulación de algunos autocares escolares a partir de las 17 horas.

Tabla 6.1: Parámetros obtenidos en el tramo Mandri ASC

Tramo	α	β	C (veh/h)	T_0 (s)
Mandri ASC	1.6	1.5	1460	114

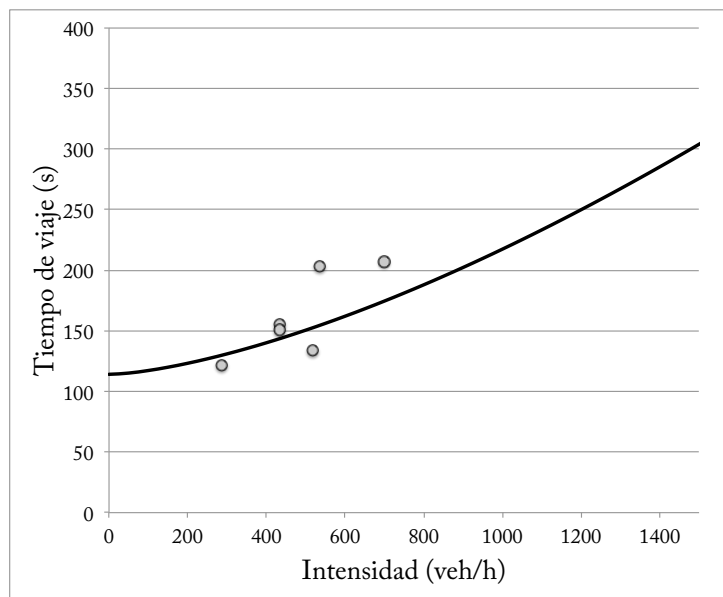


Figura 6.2: Estimación de la curva BPR junto con los datos reales obtenidos en el tramo Mandri ASC.

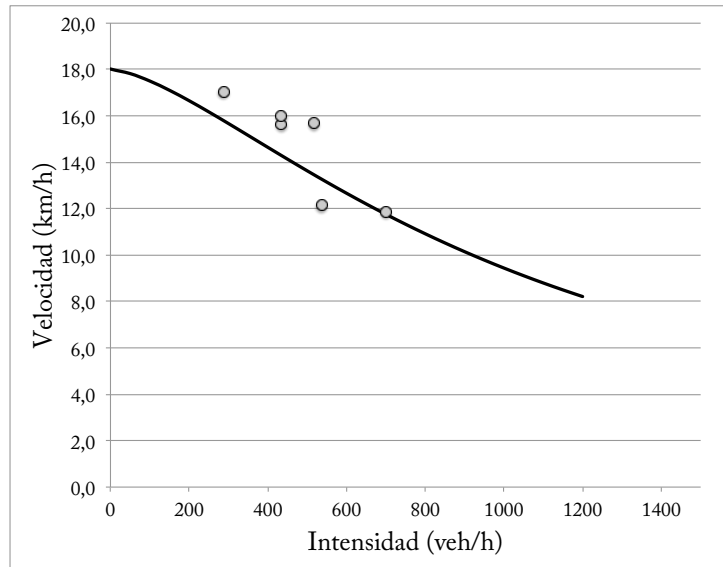


Figura 6.3: Representación de la velocidad junto con los datos reales, a partir de los parámetros estimados de BPR en el tramo Mandri ASC.

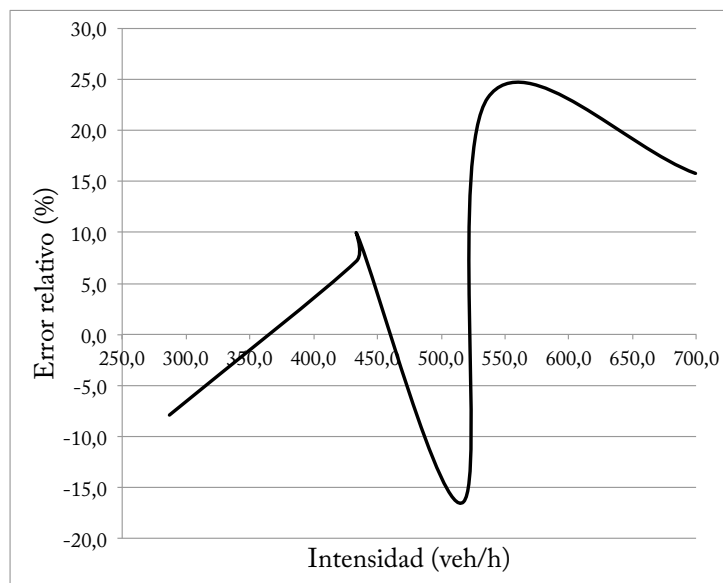


Figura 6.4: Error relativo obtenido tras la estimación del tramo Mandri ASC.

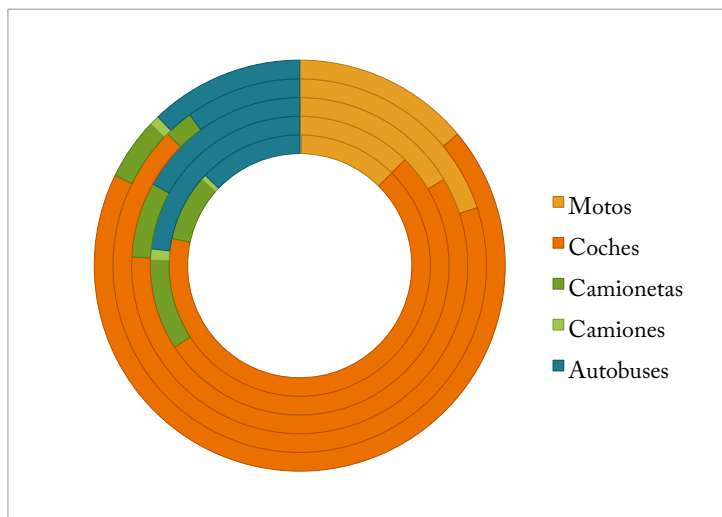


Figura 6.5: Composición del tráfico del tramo Mandri ASC de cada una de las mediciones.

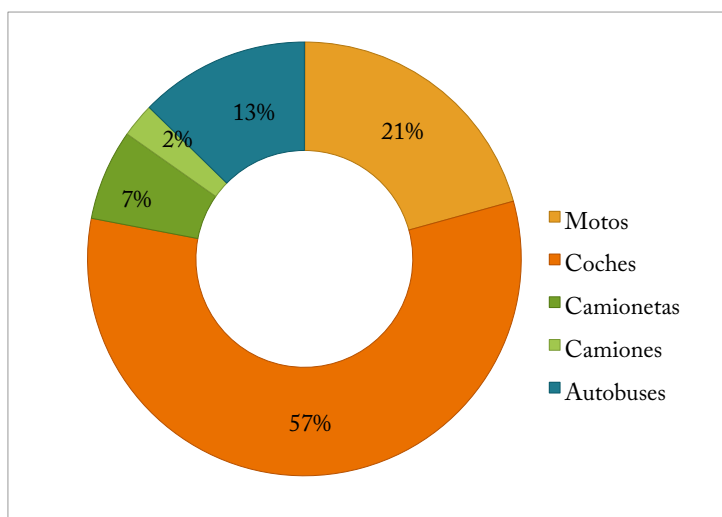


Figura 6.6: Composición media del tráfico del tramo Mandri ASC.

6.3. Tramo Mandri DESC

Tras las mediciones realizadas en este tramo se ha observado una circulación más intensa que en el sentido opuesto de la misma calle. Este tramo también contiene el itinerario de dos líneas de autobús público. Se cree que la intensidad más elevada que en el sentido ascendente del tramo se debe a que este tramo acoge por la mañana la circulación de camionetas de mercancía junto con autobuses escolares. Es decir, mientras que el sentido ascendente presenta circulación de autobuses adicionales por la tarde, este tramo contiene la circulación de dos líneas de autobús, camionetas de mercancías y los vehículos escolares juntos por la mañana. Es una calle que presenta muy baja intensidad de circulación a ciertas horas del día. A pesar de haber evaluado circulación congestionada durante algunas mediciones, no se ha llegado a observar el valor de capacidad en las mediciones.

Tabla 6.2: Parámetros obtenidos en el tramo Mandri DESC

Tramo	α	β	C (veh/h)	T_0 (s)
Mandri DESC	1.8	1.8	1460	121

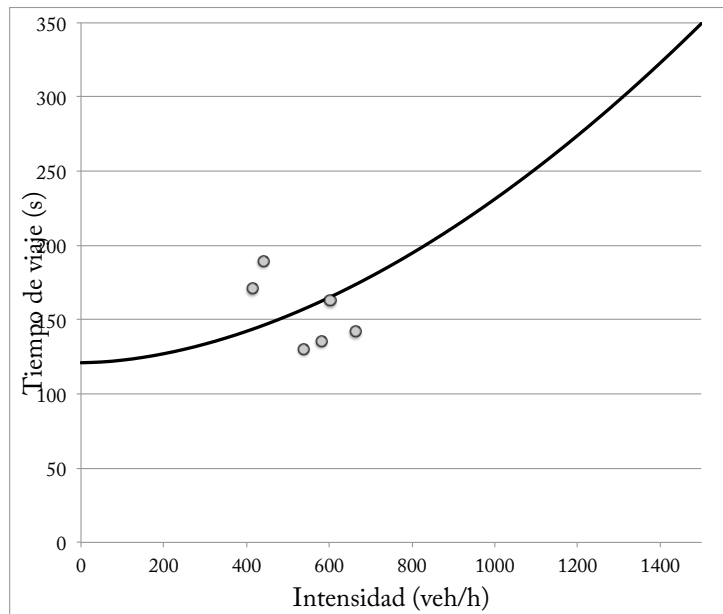


Figura 6.7: Estimación de la curva BPR junto con los datos reales obtenidos en el tramo Mandri DESC.

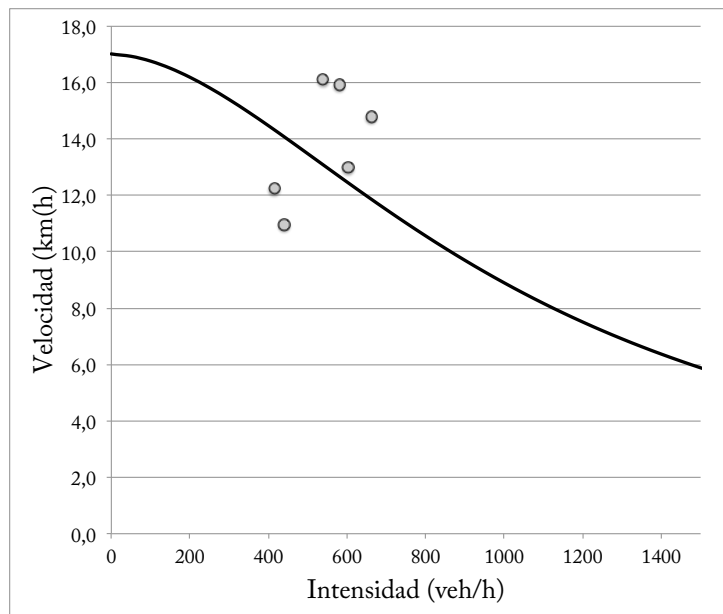


Figura 6.8: Representación de la velocidad junto con los datos reales, a partir de los parámetros estimados de BPR en el tramo Mandri DESC.

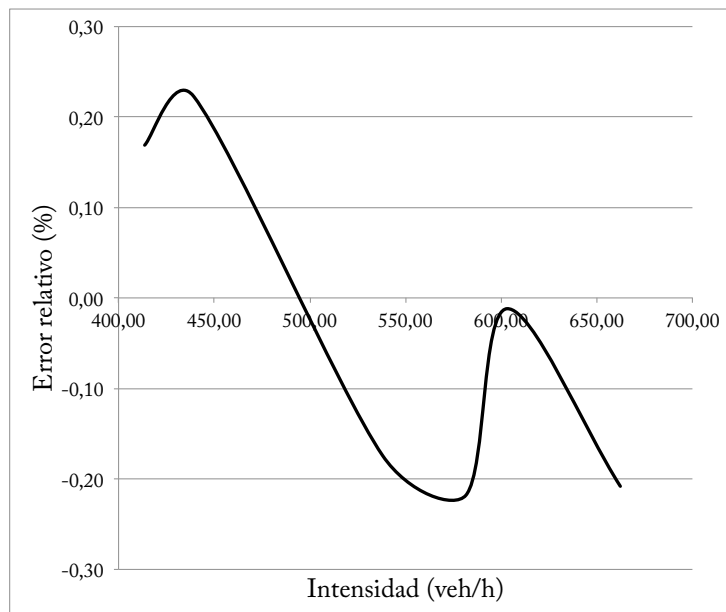


Figura 6.9: Error relativo obtenido tras la estimación del tramo Mandri DESC.

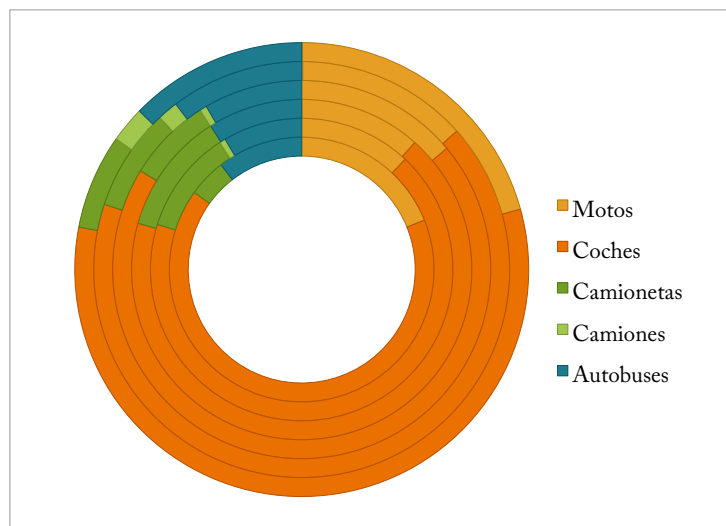


Figura 6.10: Composición del tráfico del tramo Mandri DESC de cada una de las mediciones.

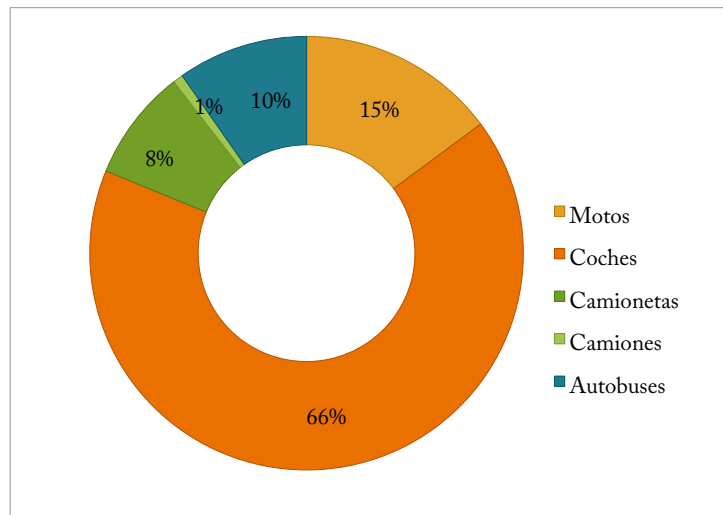


Figura 6.11: Composición media del tráfico del tramo Mandri DESC.

6.4. Tramo Mitre 121 ASC

Este tramo pertenece a una vía de gran intensidad en general. No obstante este tramo presenta menor intensidad de circulación que su sentido puesto. El tráfico de este tramo se ve mayoritariamente compuesto por vehículos ligeros y durante las mediciones se ha observado circulación congestionada pero durante periodos de tiempo no muy largos. Este tramo contiene un itinerario de línea de autobús y ocasionalmente la presencia de camiones de más de cuatro ruedas.

Tabla 6.3: Parámetros obtenidos en el tramo Mitre 121 ASC

Tramo	α	β	C (veh/h)	T_0 (s)
Mitre 121 ASC	0.15	3.8	1780	58

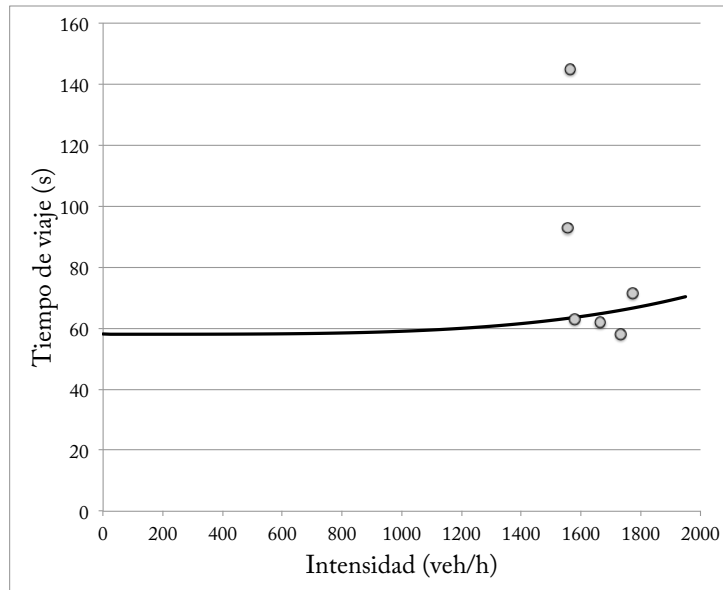


Figura 6.12: Estimación de la curva BPR junto con los datos reales obtenidos en el tramo Mitre 121 ASC.

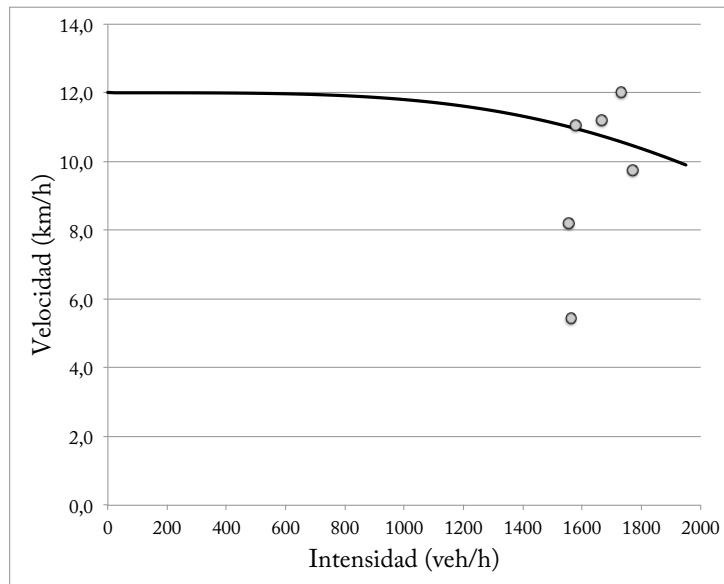


Figura 6.13: Representación de la velocidad junto con los datos reales, a partir de los parámetros estimados de BPR en el tramo Mitre 121 ASC.

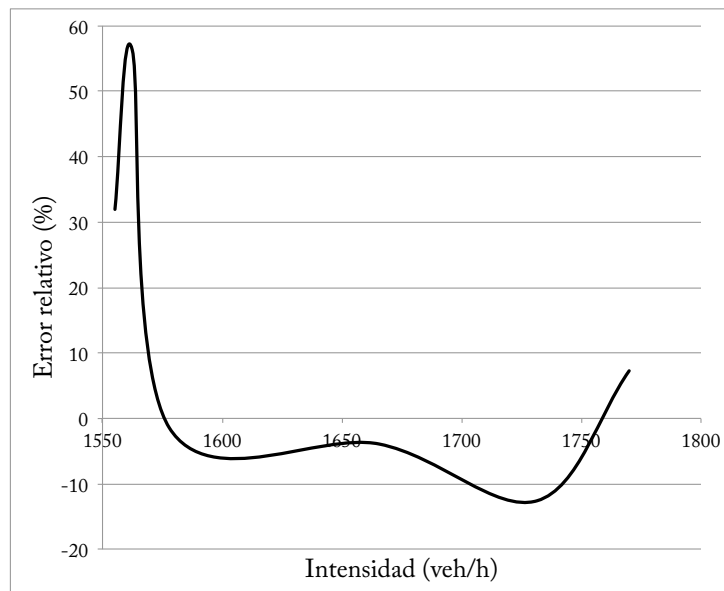


Figura 6.14: Error relativo obtenido tras la estimación del tramo Mitre 121 ASC.

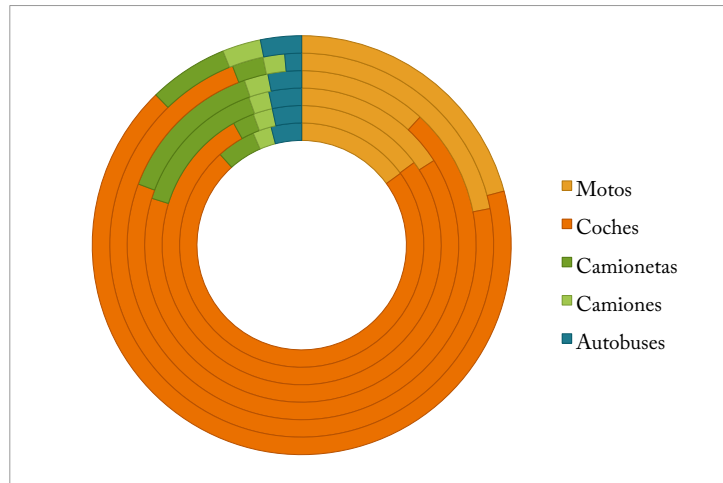


Figura 6.15: Composición del tráfico del tramo Mitre 121 ASC de cada una de las mediciones.

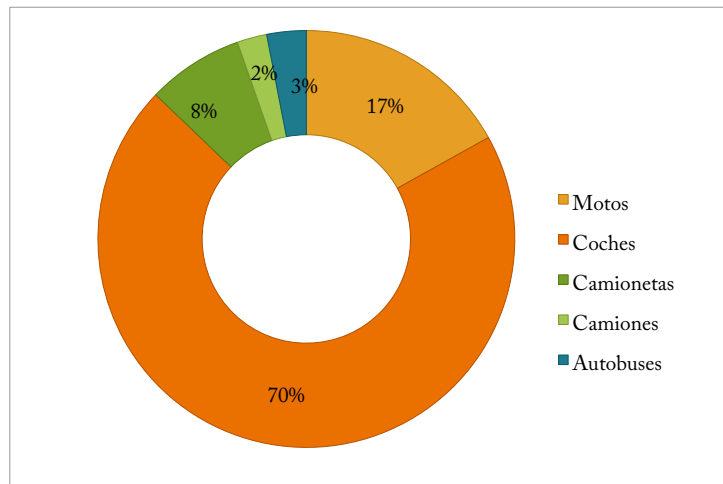


Figura 6.16: Composición media del tráfico del tramo Mitre 121 ASC.

6.5. Tramo Mitre 121 DESC

Este tramo de tres carriles pertenece a una vía de intensidad elevada. Se ha observado una elevada presencia de vehículos pesados. Este tramo contiene el paso de una línea de autobús y una circulación frecuente de camionetas y en ocasiones camiones de varios ejes. Gran cantidad de camionetas y camiones pasan por el tramo para abastecer principalmente supermercados cercanos. Justamente aguas abajo de este tramo se encuentra un hospital y uno de los accesos a éste es precisamente este tramo y el comienzo del tramo Mitre 90 DESC.

Tabla 6.4: Parámetros obtenidos en el tramo Mitre 121 DESC

Tramo	α	β	C (veh/h)	T_0 (s)
Mitre 121 DESC	2.5	3.8	1780	35

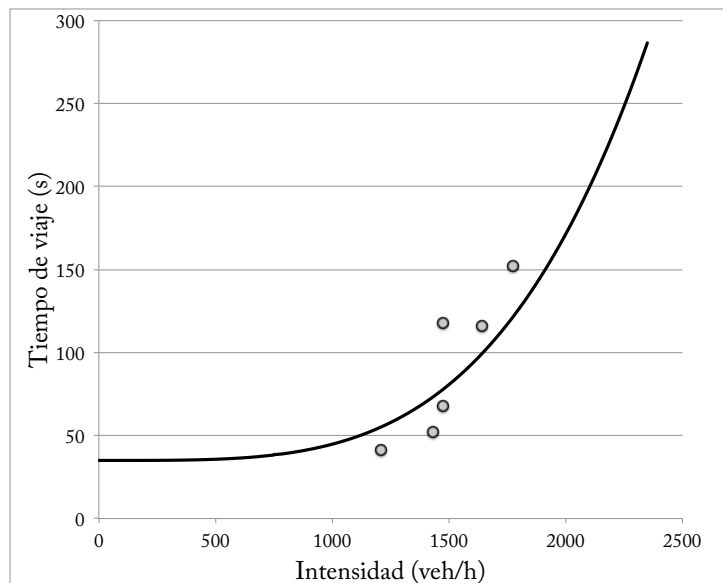


Figura 6.17: Estimación de la curva BPR junto con los datos reales obtenidos en el tramo Mitre 121 DESC.

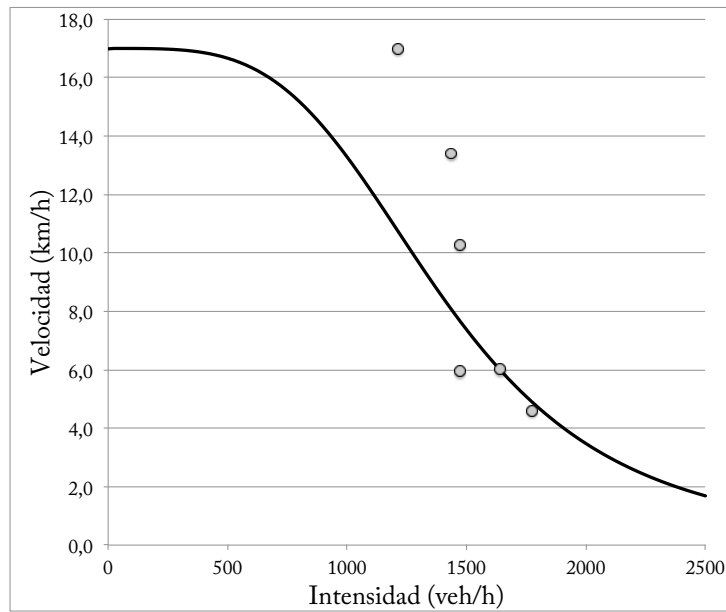


Figura 6.18: Representación de la velocidad junto con los datos reales, a partir de los parámetros estimados de BPR en el tramo Mitre 121 DESC.

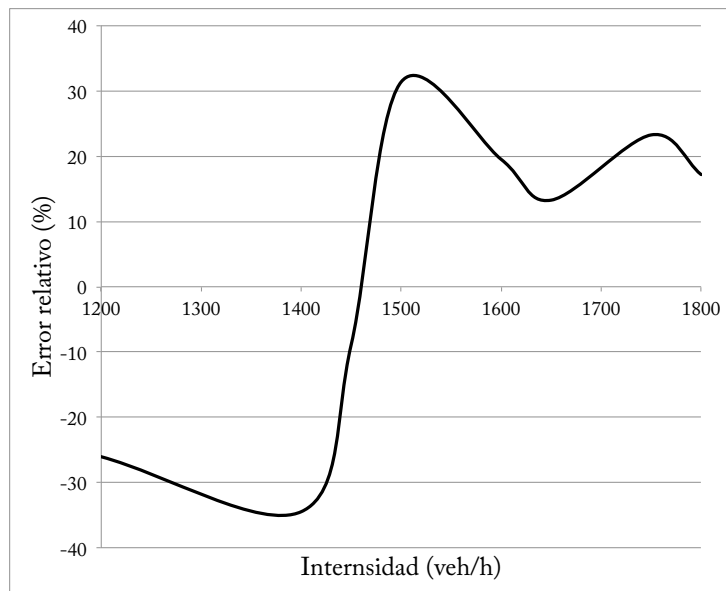


Figura 6.19: Error relativo obtenido tras la estimación del tramo Mitre 121 DESC.

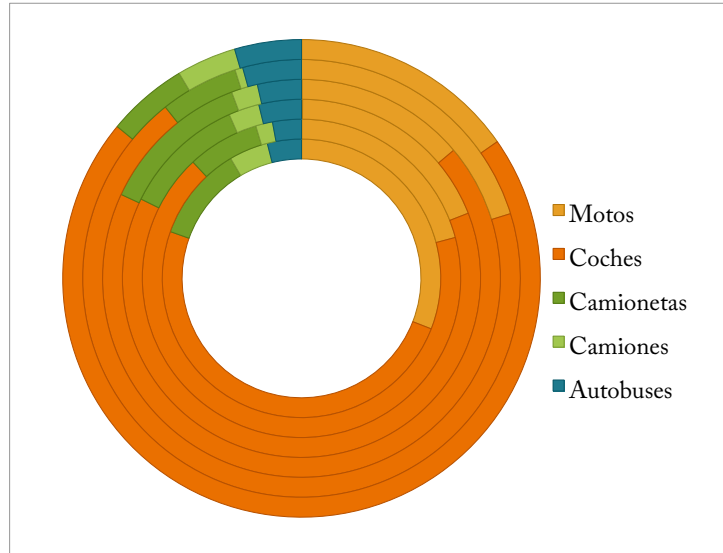


Figura 6.20: Composición del tráfico del tramo Mitre 121 DESC de cada una de las mediciones.

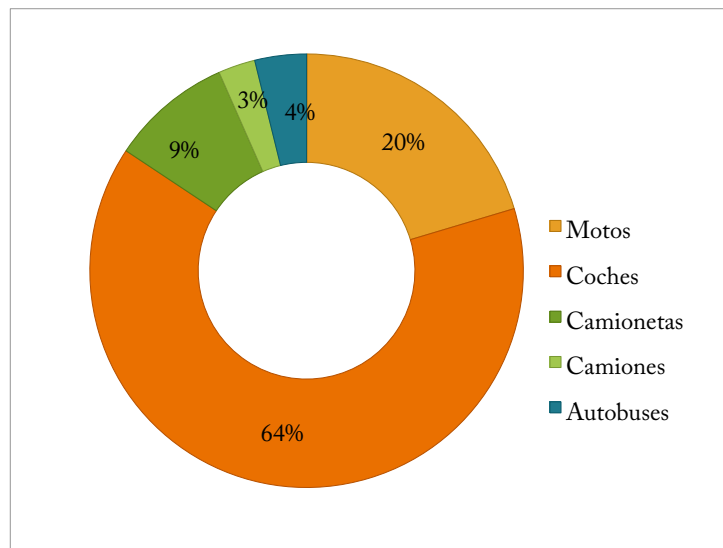


Figura 6.21: Composición media del tráfico del tramo Mitre 121 DESC.

6.6. Tramo Mitre 90 ASC

De igual modo que los demás tramos de Ronda General Mitre, el sentido ascendente en las mediciones ha presentado una intensidad menor a la del sentido descendente. Este tramo pertenece a la intersección Ronda General Mitre - Ganduxer. Por tanto a este tramo llegan los vehículos que circulan por el tramo aguas arriba **Mitre 70 ASC**, algunos vehículos que efectúan un giro desde la Calle Ganduxer antes de llegar al tramo **Ganduxer ASC** y una pequeña proporción de vehículos que abandonan La Ronda General Mitre y se desvían a una calle secundaria de un carril. Este tramo por tanto, también contiene únicamente una línea de autobús y la composición del tráfico es similar a los tramos entre los que se encuentra, **Mitre 121 ASC** y **Mitre 70 ASC**.

Tabla 6.5: Parámetros obtenidos en el tramo Mitre 90 ASC

Tramo	α	β	C (veh/h)	T_0 (s)
Mitre 90 ASC	1.3	3.8	1880	35

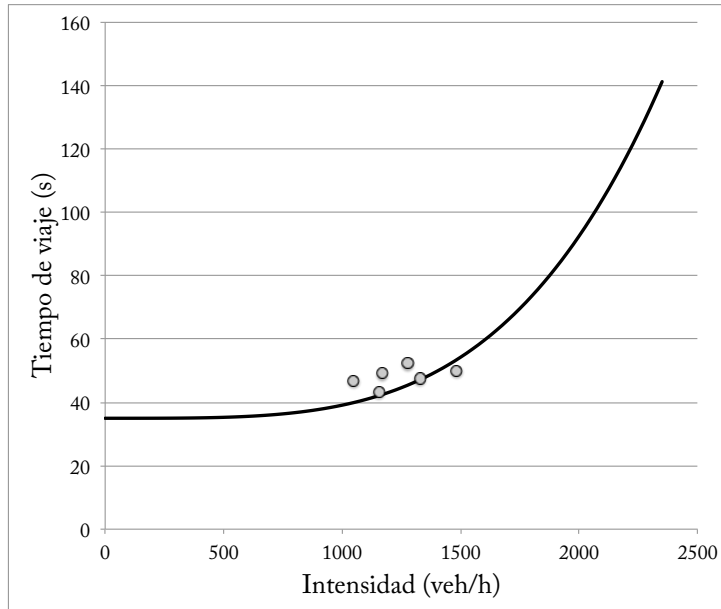


Figura 6.22: Estimación de la curva BPR junto con los datos reales obtenidos en el tramo Mitre 90 ASC.

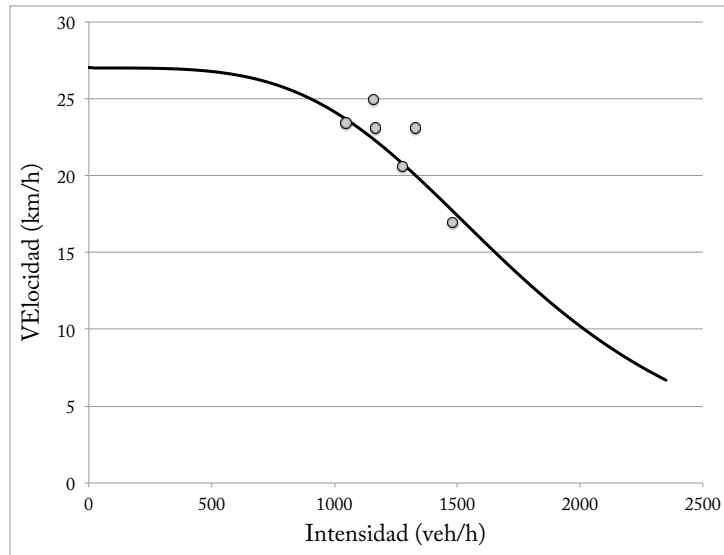


Figura 6.23: Representación de la velocidad junto con los datos reales, a partir de los parámetros estimados de BPR en el tramo Mitre 90 ASC.

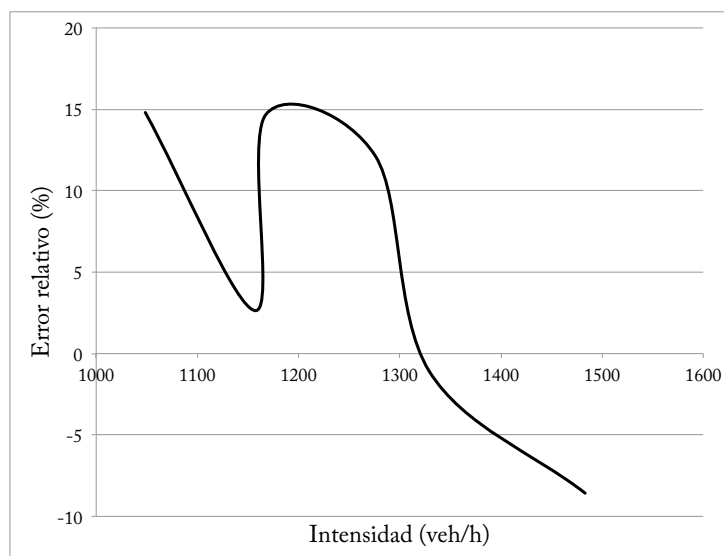


Figura 6.24: Error relativo obtenido tras la estimación del tramo Mitre 90 ASC.

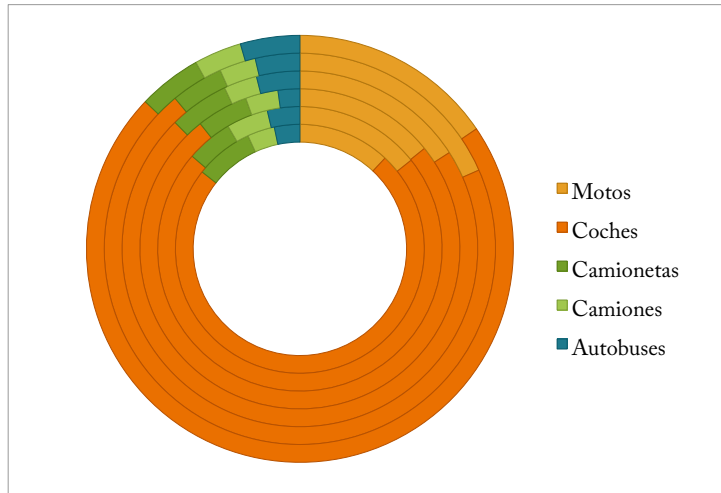


Figura 6.25: Composición del tráfico del tramo Mitre 90 ASC de cada una de las mediciones.

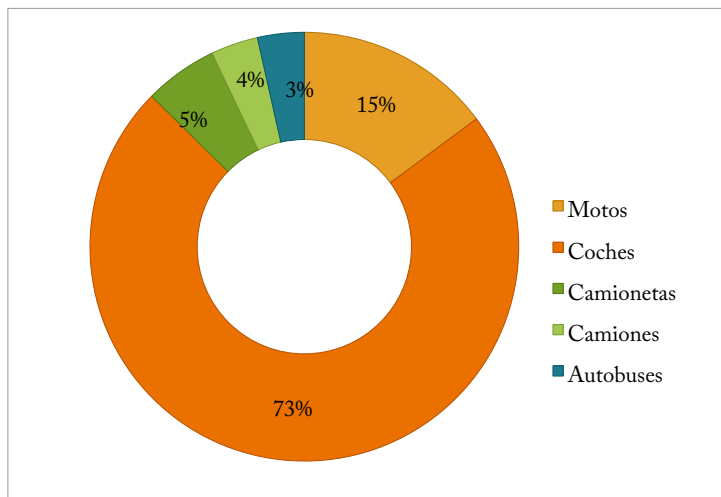


Figura 6.26: Composición media del tráfico del tramo Mitre 90 ASC.

6.7. Tramo Mitre 90 DESC

Este tramo pertenece a la intersección Ronda General Mitre con Calle Ganduxer. Por este tramo pasan principalmente los vehículos que llegan desde el tramo que tiene aguas arriba **Mitre 121 DESC** junto con los vehículos que efectúan giro para posicionarse en este tramo desde la Calle Mandri. Los vehículos que llegan desde Mandri lo hacen desde el tramo **Mandri ASC**. Adicionalmente se incorporan algunos vehículos en pequeña proporción desde una calle secundaria. Este tramo incluye tres recorridos de líneas de autobús público. Estas líneas de autobús son las que llegan desde el tramo anterior de Ronda General Mitre y dos líneas adicionales que se incorporan desde la Calle Mandri. Por ello es un tramo que en las mediciones ha presentado una intensidad mayor que el tramo que se encuentra aguas arriba.

Tabla 6.6: Parámetros obtenidos en el tramo Mitre 90 DESC

Tramo	α	β	C (veh/h)	T_0 (s)
Mitre 90 DESC	4.5	3.7	1880	37

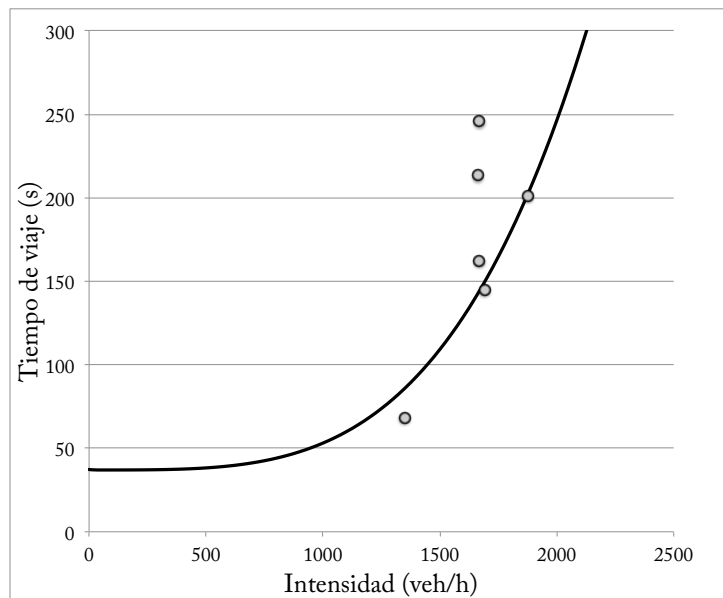


Figura 6.27: Estimación de la curva BPR junto con los datos reales obtenidos en el tramo Mitre 90 DESC.

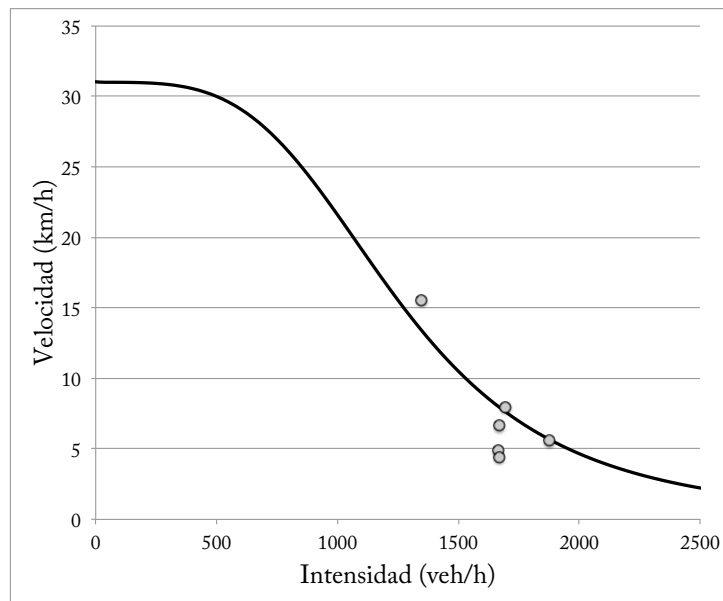


Figura 6.28: Representación de la velocidad junto con los datos reales, a partir de los parámetros estimados de BPR en el tramo Mitre 90 DESC.

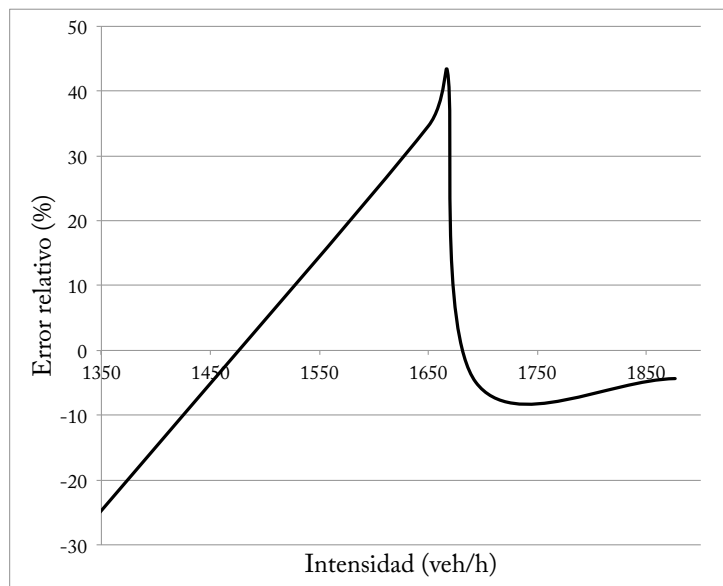


Figura 6.29: Error relativo obtenido tras la estimación del tramo Mitre 90 DESC.

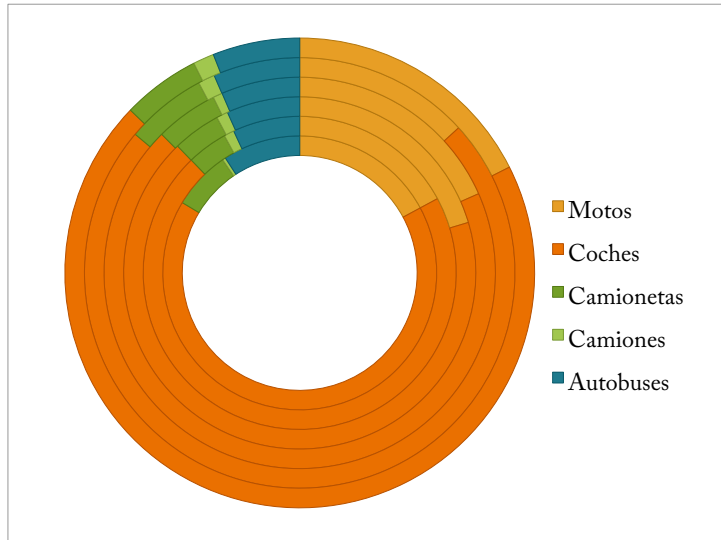


Figura 6.30: Composición del tráfico del tramo Mitre 90 DESC de cada una de las mediciones.

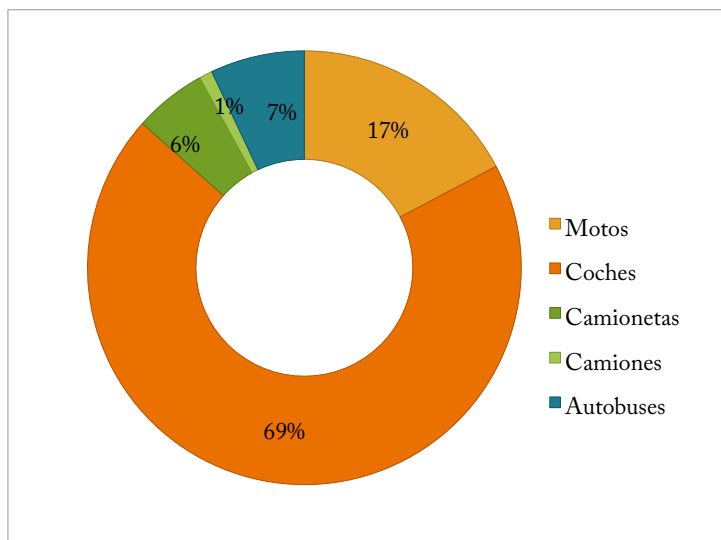


Figura 6.31: Composición media del tráfico del tramo Mitre 90 DESC.

6.8. Tramo Mitre 70 ASC

Este tramo ha seguido la trayectoria observada en las mediciones con los demás tramos de Ronda General Mitre y por tanto este tramo también ha presentado una circulación algo menor comparada con la del sentido descendente. Este tramo pertenece a la intersección estudiada pero las calles desde las cuales llegan los vehículos a este tramo se encuentran fuera del alcance de este estudio. Cabe decir que este tramo contiene únicamente un itinerario de autobús público.

Tabla 6.7: Parámetros obtenidos en el tramo Mitre 70 ASC

Tramo	α	β	C (veh/h)	T_0 (s)
Mitre 70 ASC	2.9	3.3	2240	21

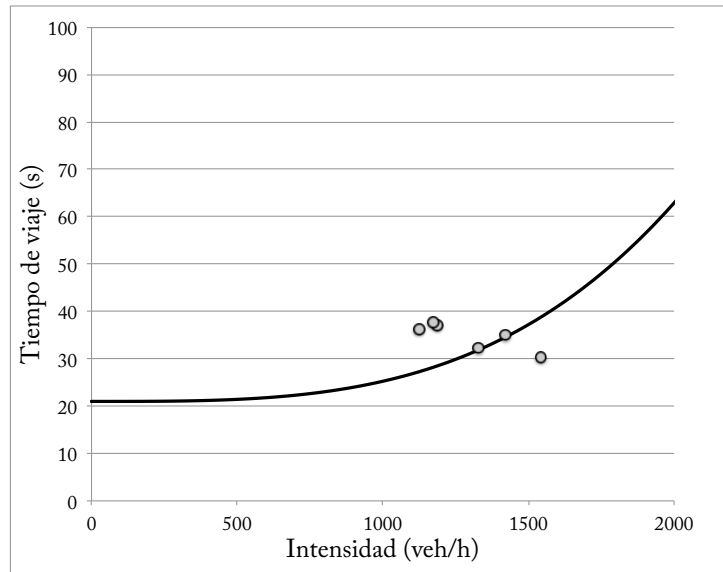


Figura 6.32: Estimación de la curva BPR junto con los datos reales obtenidos en el tramo Mitre 70 ASC.

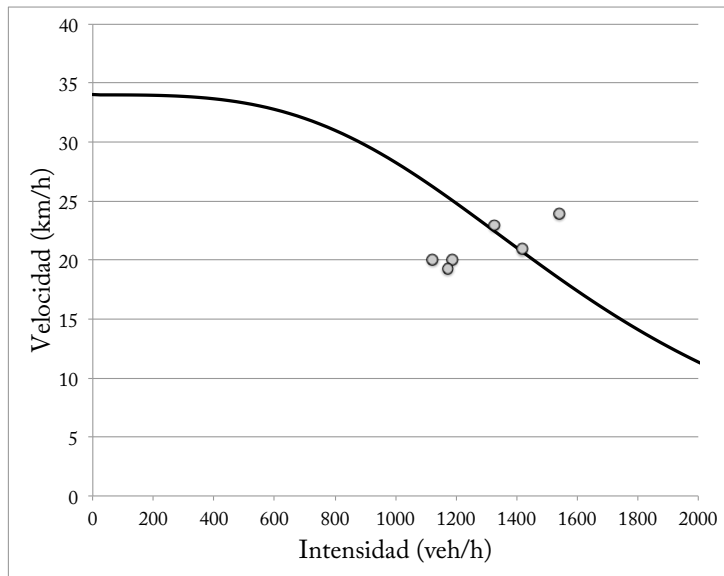


Figura 6.33: Representación de la velocidad junto con los datos reales, a partir de los parámetros estimados de BPR en el tramo Mitre 70 ASC.

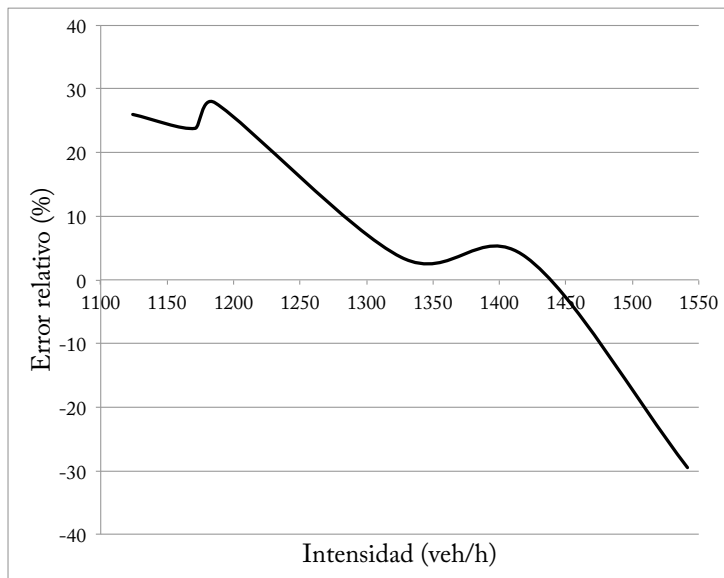


Figura 6.34: Error relativo obtenido tras la estimación del tramo Mitre 70 ASC.

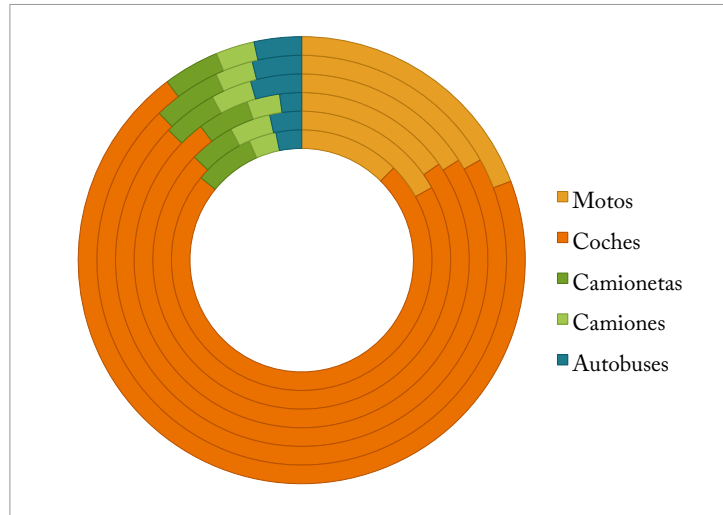


Figura 6.35: Composición del tráfico del tramo Mitre 70 ASC de cada una de las mediciones.

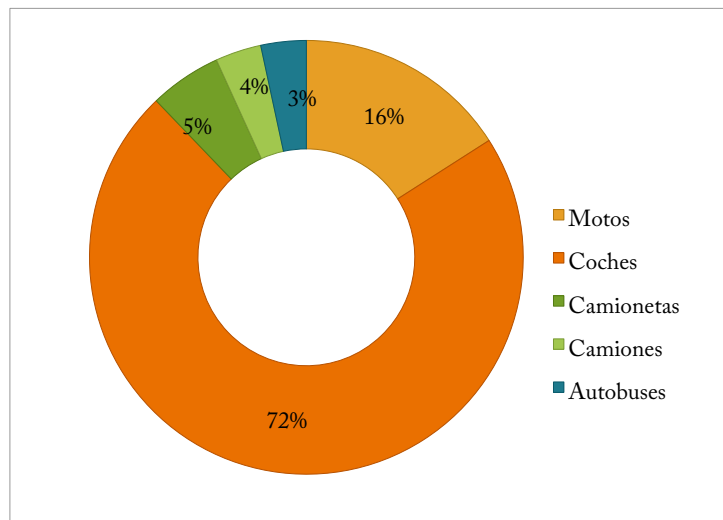


Figura 6.36: Composición media del tráfico del tramo Mitre 70 ASC.

6.9. Tramo Mitre 70 DESC

Este tramo ha resultado ser el más intenso en cuanto a circulación, según las mediciones. Por un lado los vehículos que pertenecen al tramo anterior, **Mitre 90 DESC**, se incorporan a este salvo una pequeña parte que se desvía hacia la Calle Ganduxer. Además gran parte de los vehículos que suben por la Calle Ganduxer efectúan un giro y se incorporan en este tramo². Este es el último tramo de General Mitre que contiene tres itinerarios de autobús público y una proporción de vehículos pesados como camionetas y camiones es similar a los tramos de General Mitre aguas arriba. Es el tramo en el cual se ha registrado una circulación más intensa y esto se debe a que justamente en este tramo se encuentra localizada una escuela y el flujo de vehículos escolares por la mañana y por la tarde es notable.

Tabla 6.8: Parámetros obtenidos en el tramo Mitre 70 DESC

Tramo	α	β	C (veh/h)	T_0 (s)
Mitre 70 DESC	1.6	2.5	2240	32

²En base a las mediciones realizadas se ha observado que una proporción de 30 – 60 % vehículos del total que suben por la Calle Ganduxer efectúan giro y se incorporan a General Mitre. Esta proporción varía durante el día pero este es el rango más observado.

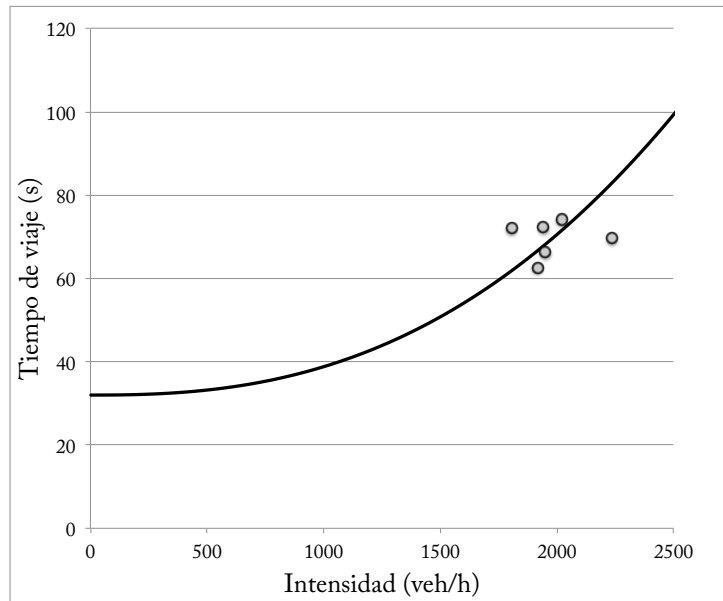


Figura 6.37: Estimación de la curva BPR junto con los datos reales obtenidos en el tramo Mitre 70 DESC.

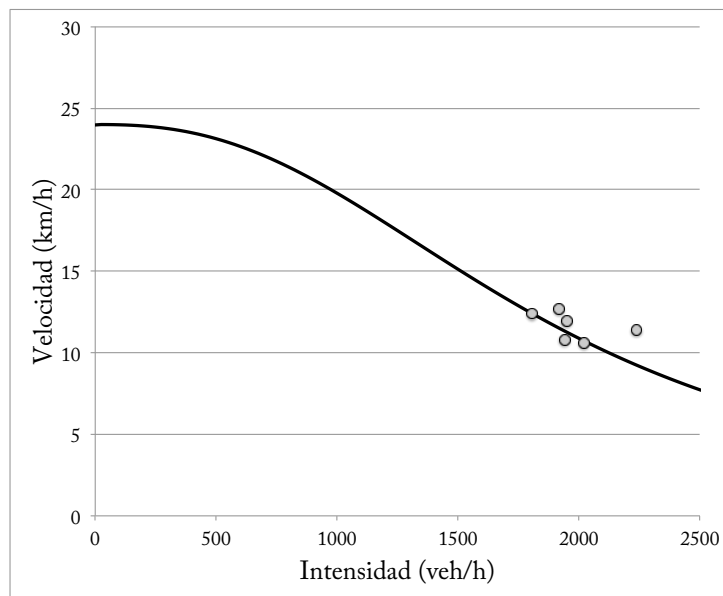


Figura 6.38: Representación de la velocidad junto con los datos reales, a partir de los parámetros estimados de BPR en el tramo Mitre 70 DESC.

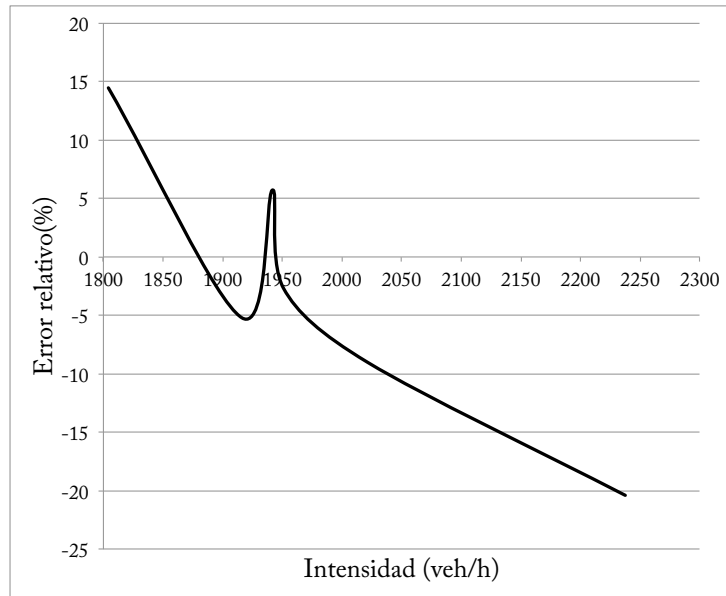


Figura 6.39: Error relativo obtenido tras la estimación del tramo Mitre 70 DESC.

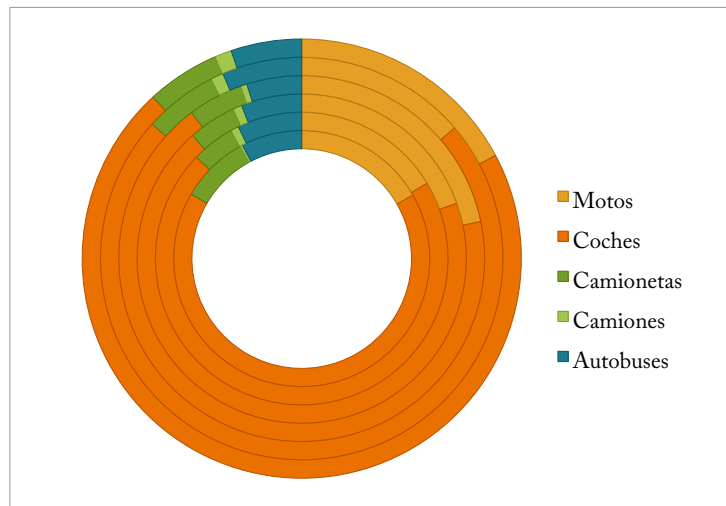


Figura 6.40: Composición del tráfico del tramo Mitre 70 DESC de cada una de las mediciones.

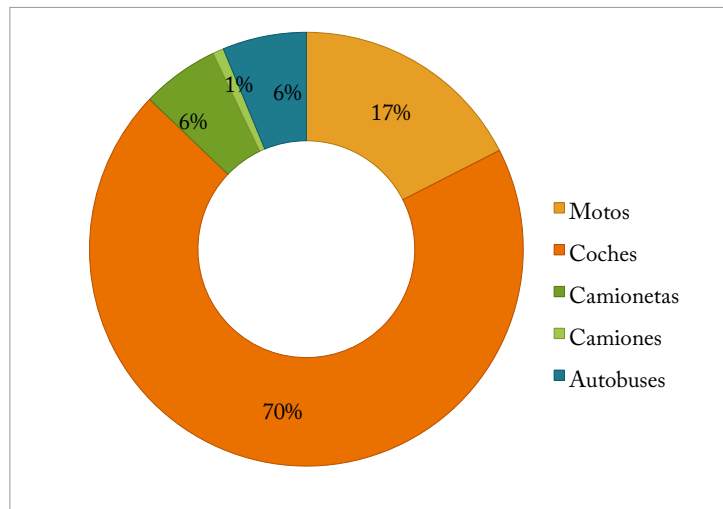


Figura 6.41: Composición media del tráfico del tramo Mitre 70 DESC.

6.10. Tramo Ganduxer ASC

Este es el último tramo que pertenece a la intersección General Mitre con Ganduxer. Este tramo contiene los vehículos que han subido por la Calle Ganduxer y no han efectuado giro para incorporarse en el tramo Mitre 70 DESC y adicionalmente una pequeña proporción de vehículos que se incorporan desde Mitre 90 DESC. Es un tramo de tres carriles. Por este tramo circulan además bicicletas pero no se las ha contabilizado porque este tramo presenta una separación de carriles destinados a vehículos motorizados y bicicletas. En ocasiones se ha observado una circulación discontinua debido a la intersección que precede, pero en general la circulación que se ha podido medir ha sido estable y por ello no se ha llegado al valor de la capacidad.

Tabla 6.9: Parámetros obtenidos en el tramo Ganduxer ASC

Tramo	α	β	C (veh/h)	T_0 (s)
Ganduxer ASC	2.9	1.8	2260	82

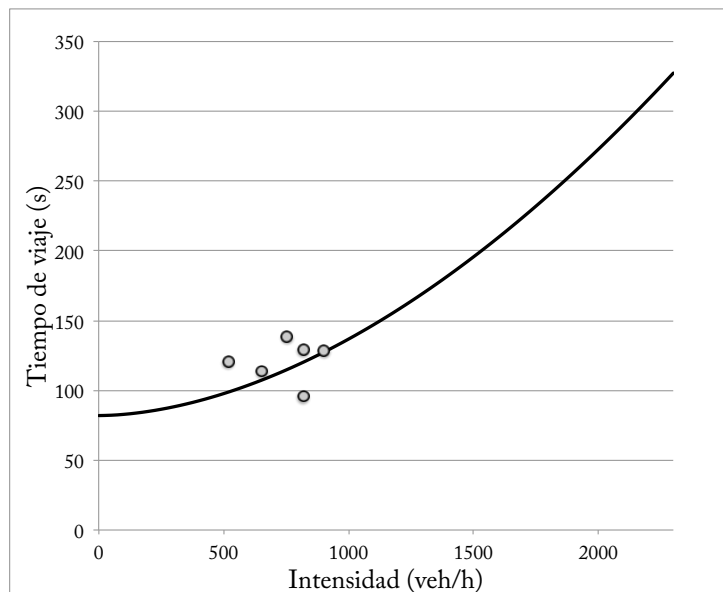


Figura 6.42: Estimación de la curva BPR junto con los datos reales obtenidos en el tramo Ganduxer ASC.

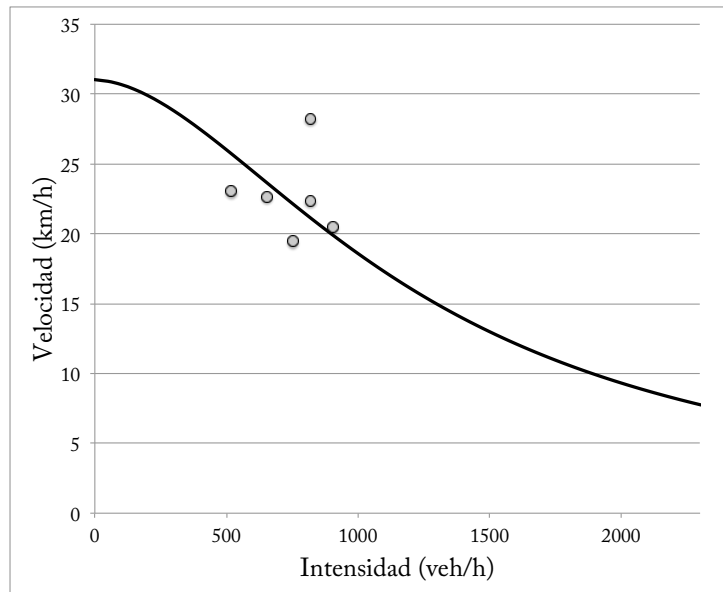


Figura 6.43: Representación de la velocidad junto con los datos reales, a partir de los parámetros estimados de BPR en el tramo Ganduxer ASC.

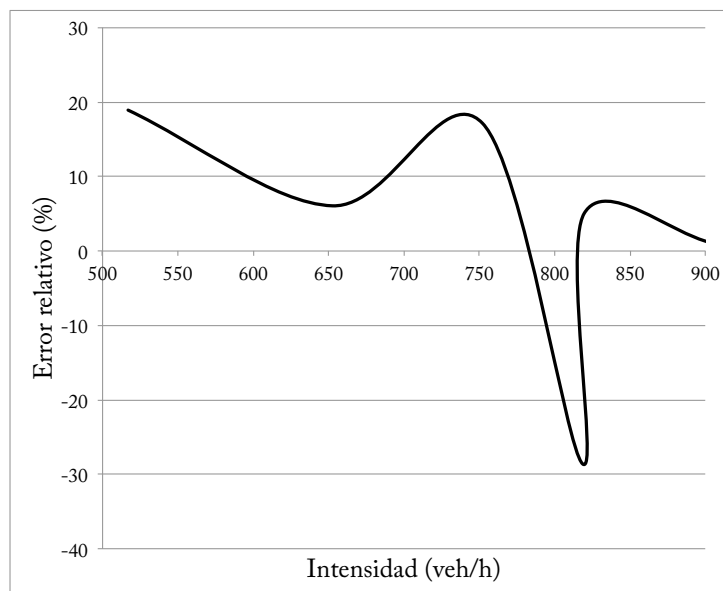


Figura 6.44: Error relativo obtenido tras la estimación del tramo Ganduxer ASC.

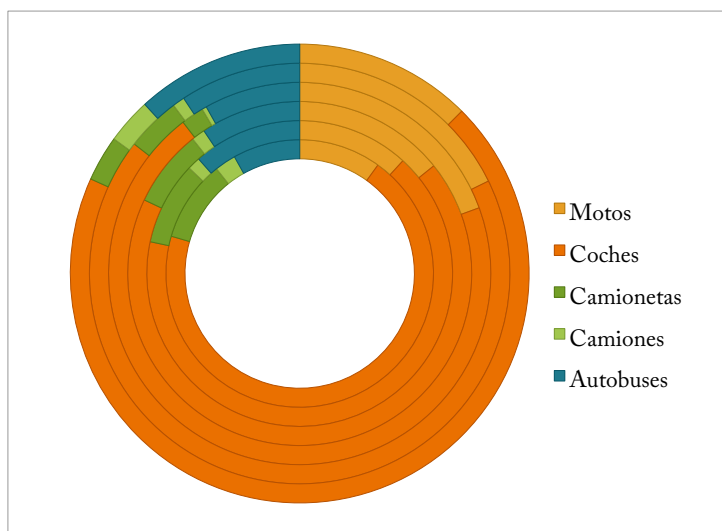


Figura 6.45: Composición del tráfico del tramo Ganduxer ASC de cada una de las mediciones.

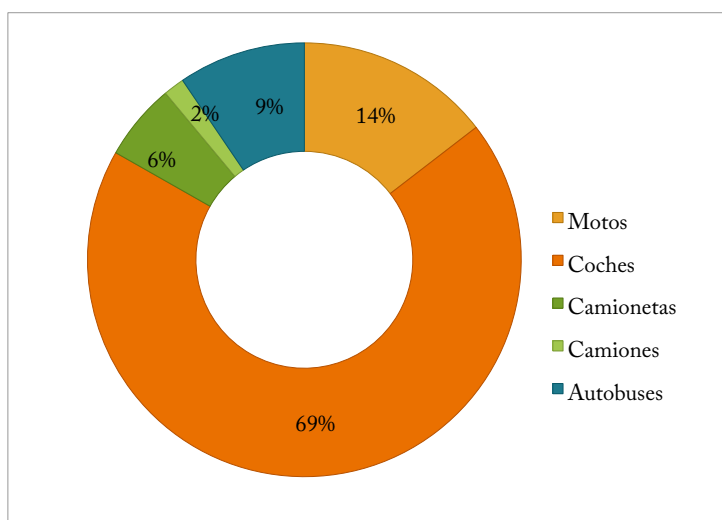


Figura 6.46: Composición media del tráfico del tramo Ganduxer ASC.

6.11. Resumen de resultados

Se presentan en la tabla adjunta los parámetros α y β estimados para cada tramo estudiado así como la capacidad que ha sido considerada en los cálculos (ver capítulo 5.2.3) y el tiempo de viaje en circulación libre que se considera por TomTom.

Tabla 6.10: Tabla resumen de los resultados obtenidos para todos los tramos.

Tramo	α	β	C (veh/h)	T_0 (s)
Man ASC	1.6	1.5	1460	114
Man DESC	1.8	1.8	1460	121
M 121 ASC	0.15	3.8	1780	58
M 121 DESC	2.5	3.8	1780	35
M 90ASC	1.3	3.8	1880	35
M 90DESC	4.5	3.7	1880	37
M 70ASC	2.9	3.3	2240	21
M 70DESC	1.6	2.5	2240	32
G ASC	2.9	1.8	2260	82

Capítulo 7

Conclusiones y futuros pasos

Tras los resultados presentados en el capítulo anterior se debe realizar un análisis de estos. Primeramente se debe hacer una reflexión acerca del origen de este estudio para comparar lo que se deseaba analizar, se esperaba obtener y lo que finalmente ha resultado. El objetivo de este proyecto ha sido por un lado estimar la curva tiempo de viaje - intensidad de algunas calles del distrito Sant Gervasi - Sarrià de Barcelona y por otro observar si es posible aplicar las mediciones reales de la intensidad tomadas *in situ* junto con las respuestas de velocidad obtenidas por TomTom para realizar esa calibración.

En este procedimiento cobran importancia primero las consideraciones que se deben tener para aplicar la fórmula BPR. Tal y como se ha explicado anteriormente es un modelo efectivo en situaciones en que la demanda se encuentra por debajo de la capacidad de la vía. Este modelo presenta una curva ascendente incluso cuando la intensidad de circulación excede la capacidad. Tal y como se ha mencionado esto en general no es posible y por periodos de tiempo largos, pero de forma puntual se puede presentar dando lugar a un factor de hora punta FHP reducido. Estos dos tipos de comportamiento se modelan con los parámetros α y β . El parámetro α representa el aumento del tiempo de viaje cuando la demanda es reducida o bien se encuentra muy por debajo de la capacidad. El segundo parámetro, β , muestra el aumento del tiempo de viaje cuando la demanda se encuentra próxima a la capacidad o incluso la supera. Nótese que la expresión de la velocidad tomada a partir de la curva BPR deja de ser válida cuando la demanda excede la capacidad (ver 4.1).

En segundo lugar es importante destacar las herramientas necesarias para llevar a cabo esta estimación. En un caso ideal las herramientas a utilizar serían precisas, fáciles de obtener y de utilizar, con las cuales se obtendrían muchos datos reales que servirían para comparar con un modelo teórico al cual se

ajustarían. En el presente caso las herramientas que se han podido utilizar para obtener los datos que se han considerado como reales en la estimación han sido el servicio de TomTom y la medición manual. Dichas herramientas tienen un error, no son precisas y no permiten obtener un número elevado de datos reales.

Uno de los resultados que se esperaba obtener tras este estudio era obtener un buen uso del servicio que ofrece TomTom de forma online. De este modo se podrían obtener aforamientos de calles utilizando cualquier método de aforo junto con los datos de velocidades de TomTom para obtener relaciones de intensidad - velocidad de algunas calles. Posiblemente a continuación extender la aplicabilidad de las relaciones para hacer una estimación de la intensidad de circulación de algunas vías que sean similares a las analizadas. Otro de los resultados que se esperaba obtener es una estimación suficientemente aceptable de los parámetros α y β con el objetivo de analizar si se pueden aplicar similares rangos de valores a vías que compartan características con los tramos analizados. De esta manera se obtendrían unos valores como pauta para unas vías concretas bajo ciertas condiciones y características.

A medida que este estudio ha ido avanzando se ha ido viendo que los resultados distaban mucho de los esperados. Por un lado el error relativo obtenido en la estimación excede los valores que podrían considerarse asumibles. Se ha apreciado una gran dispersión en los datos con intervalos de cinco minutos lo que ha llevado a unos factores de hora punta reducidos. Por otro lado los datos horarios que se han obtenido han resultado ser una cantidad insuficiente para estimar la curva.

Se interpreta que son varias las razones por las cuales los resultados no son favorables. Una de ellas es el indudable error cometido por el ser humano en el momento de realizar el aforo de la vía. Se interpreta que es un error reducido y acotado pero se debe mencionar. Otra razón es la calidad de los datos cedidos por TomTom. Se desconoce cómo se obtiene el valor del índice de fiabilidad de las medidas ya que su algoritmo no es público. No obstante los índices indicaban gran fiabilidad. ¿Entonces? Durante las mediciones en ocasiones se han observado cambios en el estado de la circulación que conducían a un congestionamiento. Al observar los datos recibidos de TomTom se ha notado que los resultados devueltos no reflejaban el estado de la circulación en el momento de las mediciones. TomTom no devuelve datos en directo porque es prácticamente imposible, y tiene cierto retraso con las respuestas. Este desfase es leve pero frecuentemente se ha notado que los resultados de TomTom no reflejaban el estado de la vía en el momento de las mediciones

tras repasar las notas de aforo. Adicionalmente se debe notar que los datos que proporciona TomTom del tiempo de viaje no son continuos sino escalonados. Es decir, supóngase un tramo con un tiempo de viaje en circulación libre de valor T_0 igual a 35. Los valores más probables de ser devueltos por TomTom son 41, 50, 54, 87, 100, 116, 140, etc. Los valores que se encuentran en medio no serán parte de los resultados, por lo tanto en la representación de los datos se obtendrán escalones en los tiempos de viaje más probables como se indica en la siguiente figura adjunta.

Finalmente se destaca la necesidad de obtener más datos para desarrollar

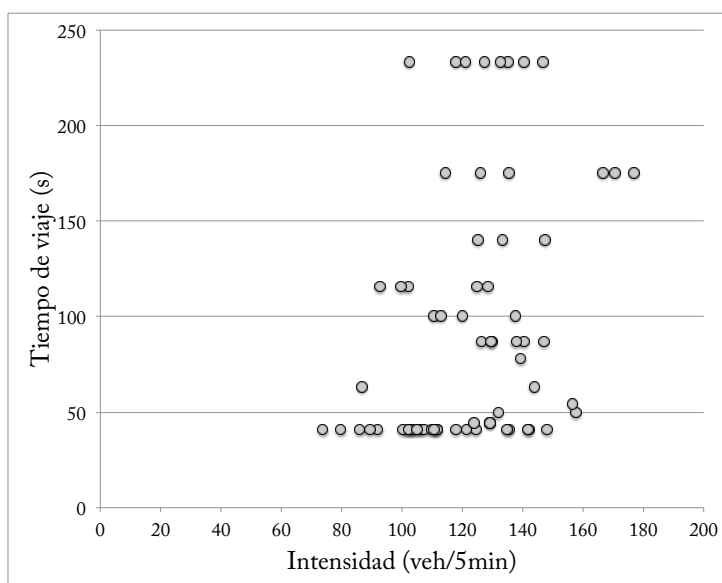


Figura 7.1: Dispersión de los datos de TomTom con mediciones de cinco minutos. Fuente: elaboración propia.

de una forma mejor la estimación de la curva. Indudablemente la fiabilidad de este estudio ha dependido de varios factores, y entre ellos es la cantidad de los datos necesarios para proceder correctamente. Las mediciones que se han realizado han sido de un total de seis horas para cada tramo y se ha obtenido un total de 642 datos de intensidades de cinco minutos que equivalen a 54h de mediciones. Este procedimiento tiene desventajas ya que realizar un gran número de mediciones es costoso. Por un lado no solamente por la mano de obra sino también por la calidad de ésta y es que, los técnicos que son capaces de realizar aforos con un margen de error reducido y llevando a cabo la clasificación del tráfico al mismo tiempo son costosos. En este proyecto se ha necesitado hacer un balance entre obtener más datos

para un tramo o estudiar más tramos pero obtener menos datos de aforo. Con el objetivo de mejorar la estimación se debe, por tanto, obtener más datos, lo que se traduce en más mediciones de aforo. Adicionalmente estos aforos deberían realizarse durante varias horas del día, varios días de la semana e incluso en varios meses.

En cuanto al coste de este estudio, en este caso el coste ha sido principalmente debido al operario que ha realizado las mediciones, al tratamiento de los datos y a la API de TomTom. El material que se ha necesitado para este procedimiento ha sido un ordenador capaz de almacenar los datos recibidos en una base de datos local de MongoDB y procesar hojas de cálculo en las que se han realizado los tratamientos de los datos para obtener los resultados. En este proyecto el servicio de TomTom ha sido gratuito porque no tiene fines comerciales, no obstante se adjunta el presupuesto teniendo en cuenta el coste estandarizado de TomTom. Dicho coste depende de las peticiones que se realicen, es decir de la cantidad de datos que se pidan¹. La siguiente tabla muestra un ejemplo del coste que tendría al mes realizar una cantidad de medidas de aforo más adecuadas. A modo ilustrativo se han considerado unas mediciones de 6h por tramo analizado al día. Por tanto se necesitarían aproximadamente 1400 peticiones a la API de Tom Tom al mes para obtener los datos de un sólo sentido de circulación en un mes. Si se consideran una cantidad total de peticiones al mes de hasta 50,000, se obtiene el siguiente coste aproximado mensual. Nótese que con esta cantidad de peticiones se podrían llegar a obtener hasta diecisiete tramos de vía de doble sentido, cada uno con seis horas de datos al día.

Tabla 7.1: Representación del coste principal del proyecto.

	Precio	Horas (h)	Total (€/mes)
Operario para el aforo	10€/h	120	1200
Tratamiento de datos	10€/h	160	1600
Servicio TomTom	25€/50000 p/mes	-	25
Total (€/mes)			2.825

El coste de la base de datos no se ha incluido ya que la respuesta de TomTom ocupa poco espacio de almacenamiento y por tanto se puede utilizar el plan básico de Mongo DB el cual es gratuito.

¹Precios mostrados en el portal de TomTom Developers para proyectos públicos.

Índice de Figuras

2.1. Tipos de intensidad: carril (sección S1), sentido (sección S2) y calzada (sección S3). Fuente: elaboración propia.	3
2.2. Mapa de Barcelona con las IMD indicadas para las vías principales de acceso. Fuente: Ministerio de Fomento. Mapa provincial año 2016.	5
2.3. Tipos de densidad: carril (sección S1-S'1), sentido (sección S2-S'2) y calzada (sección S3-S'3). Fuente: elaboración propia. . .	8
3.1. Representación esquemática de la relación velocidad - densidad. Fuente: elaboración propia.	11
3.2. Representación esquemática de la relación intensidad - densidad. Fuente: elaboración propia.	12
3.3. Representación esquemática de la relación intensidad - velocidad. Fuente: elaboración propia.	14
4.2. Formas que toma la curva teórica y sus limitaciones. Fuente: elaboración propia.	18
4.3. Localización del distrito Sarrià - Sant Gervasi. Fuente: Ajuntament de Barcelona.	20
4.4. Secciones de la calle Mandri	21
4.5. Mapa de la localización de la Ronda General Mitre. Fuente: elaboración propia.	22
4.6. Secciones de la calle Ronda General Mitre	23
4.7. Mapa de la localización de la Calle Mandri. Fuente: elaboración propia.	24
4.8. Secciones de la calle Mandri	25
4.9. Mapa de la localización de la Calle Mandri. Fuente: elaboración propia.	26
4.10. Secciones de la calle Ganduxer	26

ÍNDICE DE FIGURAS

5.1. Fotografía de lo que se ha utilizado para aforar. Clicker, hoja de aforo. Fuente: elaboración propia.	29
5.2. Tramos estudiados en este proyecto. Etiquetas en rojo indican el punto para el cual se ha pedido la velocidad y tramo de influencia indicado. Vías en color naranja indican sentido ascendente y vías en azul indican sentido descendente. Fuente: elaboración propia.	31
5.3. Tabla que indica ejemplo horario. Fuente: elaboración propia. .	38
5.4. Representación obtenida tras el tratamiento de los datos horarios. Fuente: elaboración propia.	38
5.5. Secciones de la calle Mandri	46
5.6. Ejemplo de una curva BPR para cierta capacidad, por el momento sin calibrar. Fuente: elaboración propia.	52
6.1. Proporción de rangos que toma el índice de fiabilidad de Tom-Tom.	54
6.2. Estimación de la curva BPR junto con los datos reales obtenidos en el tramo Mandri ASC.	56
6.3. Representación de la velocidad junto con los datos reales, a partir de los parámetros estimados de BPR en el tramo Mandri ASC.	57
6.4. Error relativo obtenido tras la estimación del tramo Mandri ASC.	57
6.5. Composición del tráfico del tramo Mandri ASC de cada una de las mediciones.	58
6.6. Composición media del tráfico del tramo Mandri ASC. . . .	58
6.7. Estimación de la curva BPR junto con los datos reales obtenidos en el tramo Mandri DESC.	60
6.8. Representación de la velocidad junto con los datos reales, a partir de los parámetros estimados de BPR en el tramo Mandri DESC.	60
6.9. Error relativo obtenido tras la estimación del tramo Mandri DESC.	61
6.10. Composición del tráfico del tramo Mandri DESC de cada una de las mediciones.	61
6.11. Composición media del tráfico del tramo Mandri DESC. . . .	62
6.12. Estimación de la curva BPR junto con los datos reales obtenidos en el tramo Mitre 121 ASC.	63
6.13. Representación de la velocidad junto con los datos reales, a partir de los parámetros estimados de BPR en el tramo Mitre 121 ASC.	64

ÍNDICE DE FIGURAS

6.14. Error relativo obtenido tras la estimación del tramo Mitre 121 ASC.	64
6.15. Composición del tráfico del tramo Mitre 121 ASC de cada una de las mediciones.	65
6.16. Composición media del tráfico del tramo Mitre 121 ASC. . . .	65
6.17. Estimación de la curva BPR junto con los datos reales obte- nidos en el tramo Mitre 121 DESC.	66
6.18. Representación de la velocidad junto con los datos reales, a partir de los parámetros estimados de BPR en el tramo Mitre 121 DESC.	67
6.19. Error relativo obtenido tras la estimación del tramo Mitre 121 DESC.	67
6.20. Composición del tráfico del tramo Mitre 121 DESC de cada una de las mediciones.	68
6.21. Composición media del tráfico del tramo Mitre 121 DESC. . . .	68
6.22. Estimación de la curva BPR junto con los datos reales obte- nidos en el tramo Mitre 90 ASC.	69
6.23. Representación de la velocidad junto con los datos reales, a partir de los parámetros estimados de BPR en el tramo Mitre 90 ASC.	70
6.24. Error relativo obtenido tras la estimación del tramo Mitre 90 ASC.	70
6.25. Composición del tráfico del tramo Mitre 90 ASC de cada una de las mediciones.	71
6.26. Composición media del tráfico del tramo Mitre 90 ASC.	71
6.27. Estimación de la curva BPR junto con los datos reales obte- nidos en el tramo Mitre 90 DESC.	72
6.28. Representación de la velocidad junto con los datos reales, a partir de los parámetros estimados de BPR en el tramo Mitre 90 DESC.	73
6.29. Error relativo obtenido tras la estimación del tramo Mitre 90 DESC.	73
6.30. Composición del tráfico del tramo Mitre 90 DESC de cada una de las mediciones.	74
6.31. Composición media del tráfico del tramo Mitre 90 DESC. . . .	74
6.32. Estimación de la curva BPR junto con los datos reales obte- nidos en el tramo Mitre 70 ASC.	75
6.33. Representación de la velocidad junto con los datos reales, a partir de los parámetros estimados de BPR en el tramo Mitre 70 ASC.	76

ÍNDICE DE FIGURAS

6.34. Error relativo obtenido tras la estimación del tramo Mitre 70 ASC.	76
6.35. Composición del tráfico del tramo Mitre 70 ASC de cada una de las mediciones.	77
6.36. Composición media del tráfico del tramo Mitre 70 ASC.	77
6.37. Estimación de la curva BPR junto con los datos reales obte- nidos en el tramo Mitre 70 DESC.	79
6.38. Representación de la velocidad junto con los datos reales, a partir de los parámetros estimados de BPR en el tramo Mitre 70 DESC.	79
6.39. Error relativo obtenido tras la estimación del tramo Mitre 70 DESC.	80
6.40. Composición del tráfico del tramo Mitre 70 DESC de cada una de las mediciones.	80
6.41. Composición media del tráfico del tramo Mitre 70 DESC.	81
6.42. Estimación de la curva BPR junto con los datos reales obte- nidos en el tramo Ganduxer ASC.	82
6.43. Representación de la velocidad junto con los datos reales, a partir de los parámetros estimados de BPR en el tramo Gan- duxer ASC.	83
6.44. Error relativo obtenido tras la estimación del tramo Ganduxer ASC.	83
6.45. Composición del tráfico del tramo Ganduxer ASC de cada una de las mediciones.	84
6.46. Composición media del tráfico del tramo Ganduxer ASC.	84
7.1. Dispersión de los datos de TomTom con mediciones de cinco minutos. Fuente: elaboración propia.	88

Índice de Tablas

5.1. Clasificación de vías urbanas según su funcionalidad. Fuente: HCM, Capítulo 10.	44
5.2. Volúmenes de servicio para vías urbanas según clase y número de carriles. Fuente: HCM, Capítulo 10.	44
5.3. Condiciones consideradas para la asignación de volúmenes de las vías. Fuente: HCM, Capítulo 10.	45
5.4. Resumen del valor de los parámetros a utilizar en la estimación de la capacidad para una intersección.	48
5.5. Resumen de los parámetros a utilizar en la estimación de la capacidad con la velocidad de circulación.	49
5.6. Tabla resumen de las intensidades máximas obtenidas en las mediciones.	50
5.7. Tabla resumen de todas las capacidades calculadas para los tramos.	51
5.8. Tabla resumen de los valores escogidos de capacidad estimada para los tramos.	51
6.1. Parámetros obtenidos en el tramo Mandri ASC	56
6.2. Parámetros obtenidos en el tramo Mandri DESC	59
6.3. Parámetros obtenidos en el tramo Mitre 121 ASC	63
6.4. Parámetros obtenidos en el tramo Mitre 121 DESC	66
6.5. Parámetros obtenidos en el tramo Mitre 90 ASC	69
6.6. Parámetros obtenidos en el tramo Mitre 90 DESC	72
6.7. Parámetros obtenidos en el tramo Mitre 70 ASC	75
6.8. Parámetros obtenidos en el tramo Mitre 70 DESC	78
6.9. Parámetros obtenidos en el tramo Ganduxer ASC	82
6.10. Tabla resumen de los resultados obtenidos para todos los tramos.	85
7.1. Representación del coste principal del proyecto.	89

Bibliografía

- [1] Magín Campos Cacheda. *Una metodología para el análisis de la congestión del tráfico metropolitano*. PhD thesis, Universitat Politècnica de Catalunya, 2011.
- [2] Departament d'Estadística i Difusió de Dades. Ajuntament de Barcelona. Estadísticas urbanísticas. superficie del territorio. <http://www.bcn.cat/estadistica/catala/index.html>, 2017.
- [3] Mansoureh Jeihani, Stephen Lawe, and JP Connolly. Improving traffic assignment model using intersection delay function. In *47th Annual Transportation Research Forum 2006*, volume 1, Vermont, EEUU, 2006.
- [4] Stefano Manzo. Investigating uncertainty in BPR formula parameters: a case study. Lyon, Francia, 2013. Technical University of Denmark.
- [5] Ministerio de Fomento. Prescripciones y recomendaciones técnicas para la realización de estudios de tráfico de los Estudios Informativos, Anteproyectos y Proyectos de carreteras. Technical report, Secretaría de Estado de Infraestructuras, Transporte y Vivienda Secretaría General de Infraestructuras Dirección General de Carreteras Subdirección General de Estudios y Proyectos, 2014.
- [6] Enock T Mtoi and Ren Moses. Calibration and Evaluation of Link Congestion Functions: Applying Intrinsic Sensitivity of Link Speed as a Practical Consideration to Heterogeneous Facility Types within Urban Network. *Journal of Transportation Technologies*, 4(April):141–149, 2014.
- [7] R.J. Smeed. Research en road safety and traffic flow. Technical report, London Institute of Civil Engineers, 1949.
- [8] Transportation Research Board. *Highway Capacity Manual*. Transportation Research Board, National Research Council, Washington, D.C., 2000.

BIBLIOGRAFÍA

- [9] Martin Treiber. *Verkehrsökonomie*. PhD thesis, Technische Universität at Dresden, 2017.